This is a digital copy of a book that was preserved for generations on library shelves before it was carefully scanned by Google as part of a project to make the world's books discoverable online.

It has survived long enough for the copyright to expire and the book to enter the public domain. A public domain book is one that was never subject to copyright or whose legal copyright term has expired. Whether a book is in the public domain may vary country to country. Public domain books are our gateways to the past, representing a wealth of history, culture and knowledge that's often difficult to discover.

Marks, notations and other marginalia present in the original volume will appear in this file - a reminder of this book's long journey from the publisher to a library and finally to you.

Usage guidelines

Google is proud to partner with libraries to digitize public domain materials and make them widely accessible. Public domain books belong to the public and we are merely their custodians. Nevertheless, this work is expensive, so in order to keep providing this resource, we have taken steps to prevent abuse by commercial parties, including placing technical restrictions on automated querying.

We also ask that you:

+ *Make non-commercial use of the files* We designed Google Book Search for use by individuals, and we request that you use these files for personal, non-commercial purposes.
+ *Refrain from automated querying* Do not send automated queries of any sort to Google's system: If you are conducting research on machine translation, optical character recognition or other areas where access to a large amount of text is helpful, please contact us. We encourage the use of public domain materials for these purposes and may be able to help.
+ *Maintain attribution* The Google "watermark" you see on each file is essential for informing people about this project and helping them find additional materials through Google Book Search. Please do not remove it.
+ *Keep it legal* Whatever your use, remember that you are responsible for ensuring that what you are doing is legal. Do not assume that just because we believe a book is in the public domain for users in the United States, that the work is also in the public domain for users in other countries. Whether a book is still in copyright varies from country to country, and we can't offer guidance on whether any specific use of any specific book is allowed. Please do not assume that a book's appearance in Google Book Search means it can be used in any manner anywhere in the world. Copyright infringement liability can be quite severe.

About Google Book Search

Google's mission is to organize the world's information and to make it universally accessible and useful. Google Book Search helps readers discover the world's books while helping authors and publishers reach new audiences. You can search through the full text of this book on the web at `http://books.google.com/`

A propos de ce livre

Ceci est une copie numérique d'un ouvrage conservé depuis des générations dans les rayonnages d'une bibliothèque avant d'être numérisé avec précaution par Google dans le cadre d'un projet visant à permettre aux internautes de découvrir l'ensemble du patrimoine littéraire mondial en ligne.

Ce livre étant relativement ancien, il n'est plus protégé par la loi sur les droits d'auteur et appartient à présent au domaine public. L'expression "appartenir au domaine public" signifie que le livre en question n'a jamais été soumis aux droits d'auteur ou que ses droits légaux sont arrivés à expiration. Les conditions requises pour qu'un livre tombe dans le domaine public peuvent varier d'un pays à l'autre. Les livres libres de droit sont autant de liens avec le passé. Ils sont les témoins de la richesse de notre histoire, de notre patrimoine culturel et de la connaissance humaine et sont trop souvent difficilement accessibles au public.

Les notes de bas de page et autres annotations en marge du texte présentes dans le volume original sont reprises dans ce fichier, comme un souvenir du long chemin parcouru par l'ouvrage depuis la maison d'édition en passant par la bibliothèque pour finalement se retrouver entre vos mains.

Consignes d'utilisation

Google est fier de travailler en partenariat avec des bibliothèques à la numérisation des ouvrages appartenant au domaine public et de les rendre ainsi accessibles à tous. Ces livres sont en effet la propriété de tous et de toutes et nous sommes tout simplement les gardiens de ce patrimoine. Il s'agit toutefois d'un projet coûteux. Par conséquent et en vue de poursuivre la diffusion de ces ressources inépuisables, nous avons pris les dispositions nécessaires afin de prévenir les éventuels abus auxquels pourraient se livrer des sites marchands tiers, notamment en instaurant des contraintes techniques relatives aux requêtes automatisées.

Nous vous demandons également de:

+ *Ne pas utiliser les fichiers à des fins commerciales* Nous avons conçu le programme Google Recherche de Livres à l'usage des particuliers. Nous vous demandons donc d'utiliser uniquement ces fichiers à des fins personnelles. Ils ne sauraient en effet être employés dans un quelconque but commercial.

+ *Ne pas procéder à des requêtes automatisées* N'envoyez aucune requête automatisée quelle qu'elle soit au système Google. Si vous effectuez des recherches concernant les logiciels de traduction, la reconnaissance optique de caractères ou tout autre domaine nécessitant de disposer d'importantes quantités de texte, n'hésitez pas à nous contacter. Nous encourageons pour la réalisation de ce type de travaux l'utilisation des ouvrages et documents appartenant au domaine public et serions heureux de vous être utile.

+ *Ne pas supprimer l'attribution* Le filigrane Google contenu dans chaque fichier est indispensable pour informer les internautes de notre projet et leur permettre d'accéder à davantage de documents par l'intermédiaire du Programme Google Recherche de Livres. Ne le supprimez en aucun cas.

+ *Rester dans la légalité* Quelle que soit l'utilisation que vous comptez faire des fichiers, n'oubliez pas qu'il est de votre responsabilité de veiller à respecter la loi. Si un ouvrage appartient au domaine public américain, n'en déduisez pas pour autant qu'il en va de même dans les autres pays. La durée légale des droits d'auteur d'un livre varie d'un pays à l'autre. Nous ne sommes donc pas en mesure de répertorier les ouvrages dont l'utilisation est autorisée et ceux dont elle ne l'est pas. Ne croyez pas que le simple fait d'afficher un livre sur Google Recherche de Livres signifie que celui-ci peut être utilisé de quelque façon que ce soit dans le monde entier. La condamnation à laquelle vous vous exposeriez en cas de violation des droits d'auteur peut être sévère.

À propos du service Google Recherche de Livres

En favorisant la recherche et l'accès à un nombre croissant de livres disponibles dans de nombreuses langues, dont le français, Google souhaite contribuer à promouvoir la diversité culturelle grâce à Google Recherche de Livres. En effet, le Programme Google Recherche de Livres permet aux internautes de découvrir le patrimoine littéraire mondial, tout en aidant les auteurs et les éditeurs à élargir leur public. Vous pouvez effectuer des recherches en ligne dans le texte intégral de cet ouvrage à l'adresse `http://books.google.com`

3 3433 06642401 5

Gerard

201126

Traction Électrique

EXTRAIT DES LEÇONS PROFESSÉES

A L'INSTITUT ÉLECTROTECHNIQUE MONTEFIORE

PAR

Eric GERARD

DIRECTEUR DE CET INSTITUT

PROFESSEUR A L'UNIVERSITÉ DE LIÈGE

PARIS

GAUTHIER-VILLARS ÉDITEUR

Quai des Grands-Augustins, 55

1900

(Tous droits réservés.)

Traction Électrique.

Traction Électrique.

Traction Électrique.

Liège — Imprimerie de THIER, boulevard de la Sauvenière, 15

Traction Électrique

EXTRAIT DES LEÇONS PROFESSÉES

A L'INSTITUT ELECTROTECHNIQUE MONTEFIORE

PAR

Eric GERARD

DIRECTEUR DE CET INSTITUT

PROFESSEUR A L'UNIVERSITÉ DE LIÉGE

PARIS

GAUTHIER-VILLARS ÉDITEUR

Quai des Grands-Augustins, 55

1900

(Tous droits reserves.)

THE NEW YORK
PUBLIC LIBRARY
201126
ASTOR, LENOX AND
TILDEN FOUNDATIONS.
R 1900. L

Table des Matières

Pages

PRÉFACE V

CHAPITRE I.

NOTIONS GÉNÉRALES SUR LES TRAMWAYS ÉLECTRIQUES.

Voies. Effort de traction. — Moteurs. Trucs. Systèmes Thomson-Houston, Siemens, Oerlikon, Short, Walker. — Équipement et conduite des voitures 1

CHAPITRE II.

SYSTÈMES DE TRACTION DES TRAMWAYS.

Prises de courant aériennes. Trolley, frotteur, archet et rouleau. Systèmes Van Depoele, Dickinson, Short, Siemens et Walker. — Matériel des lignes aériennes de prise de courant. — Tramways à caniveau souterrain. Systèmes Bentley Knight, Siemens, Thomson-Houston. — Amenée du courant par conducteurs interrompus. Systèmes Westinghouse, Diatto, Claret et Willeumier. — Effet des fils aériens sur les téléphones. — Corrosions dues au retour par la terre. Emploi des feeders de retour, du système à trois conducteurs et des courants alternatifs — Traction par accumulateurs.

Pages

Examen des conditions techniques. Systèmes divers. Accumulateurs à charge rapide. — Systèmes mixtes. Fils aériens et caniveaux. Trolley et accumulateurs 41

CHAPITRE III.

ÉLÉMENTS D'UN PROJET DE TRACTION DE TRAMWAY.

Choix des machines génératrices. Usine électrique. — Calcul d'un avant-projet de traction de tramway 78

CHAPITRE IV.

CHEMINS DE FER ÉLECTRIQUES.

Limites d'emploi des locomotives à vapeur. Solutions possibles par l'électricité. Locomotives à prise de courant. Service par voitures automotrices. — Matériel des réseaux suburbains et métropolitains électriques. — Applications métropolitaines de la traction électrique. — Chemins de fer électriques interurbains. — Locomotives indépendantes. Système à accumulateurs. Système Heilmann. — Locomotives pour mines, usines et chantiers 92

CHAPITRE V.

COÛT DE LA TRACTION ÉLECTRIQUE.

Prix de revient de la traction animale. — Coût de la traction par prise de courant. — Traction par accumulateurs — Prix des automobiles de chemin de fer et des locomotives électriques 126

Table des Matières 135

AVANT-PROPOS

L'ouvrage que nous présentons au public est à peu de chose près la reproduction d'une partie du cours professé par M. Eric Gerard à l'Institut Électrotechnique Montefiore et qui a déjà paru sous une autre forme dans les Leçons sur l'Électricité *du même auteur.*

La Traction électrique intéresse une classe nouvelle et de plus en plus nombreuse de lecteurs qui n'ont pas le loisir de faire une étude complète des applications de l'électricité. Elle a transformé l'exploitation des lignes de tramways et elle s'étend progressivement aux chemins de fer : aujourd'hui elle a conquis sa place dans les voies métropolitaines et suburbaines, demain elle abordera les grandes lignes interurbaines.

L'Électricité se mêle ainsi de plus en plus à notre vie, et ses applications éveillent à bon droit notre curiosité scientifique.

Le présent volume contient la description des tramways élec-

triques, le calcul d'un projet de tramway, l'exposé des systèmes de propulsion électrique sur les grands chemins de fer et les prix de revient. Ces divers sujets sont présentés sous une forme mathématique élémentaire.

La compétence de l'auteur et le succès de ses publications précédentes est un sûr garant pour les lecteurs qu'ils trouveront dans ce petit traité des renseignements exacts et précis sur l'état actuel de la traction électrique sur les voies ferrées.

L'ÉDITEUR.

Chapitre I.

NOTIONS GÉNÉRALES SUR LES TRAMWAYS ÉLECTRIQUES.

Voies. Effort de traction. — La traction des tramways est devenue l'une des applications les plus importantes de l'électricité. La raison principale de ce succès réside dans les avantages que la propulsion électrique présente sur la traction animale au point de vue de l'exploitation. Grâce à la puissance et à la facilité d'arrêt des électromoteurs, on a pu porter de 8 à 12 km la vitesse normale des voitures urbaines et atteindre 18 à 20 km sur les lignes suburbaines. Il a été possible de gravir des rampes de plus de 10 pour 100, qui étaient considérées comme impraticables avec les chevaux. On a remarqué que, par suite du gain de temps qu'elle procure aux voyageurs, la traction électrique donne lieu à un accroissement de trafic qui va jusque 80 pour 100 : on a dû rapprocher les départs, accroître les dimensions des voitures ou former des trains de plusieurs véhicules. La traction électrique permet, à un moment donné, de multiplier les voitures en service, tandis qu'on ne pourrait entretenir les chevaux de réserve nécessaires à cet effet. Elle met l'exploitation des tramways à l'abri des aléas, tels que les maladies

des chevaux et la hausse des fourrages. Enfin, dans les lignes d'une certaine importance, la traction électrique a procuré une économie sérieuse.

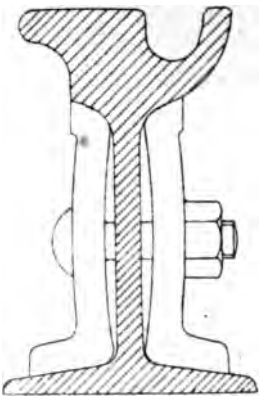

Fig. 1.

La substitution des voitures électriques aux voitures ordinaires oblige à un renforcement de la voie [1]. On utilise ordinairement dans les villes européennes des rails à gorge, fig. 1. Les Américains préfèrent le rail à gradins, fig. 2. Ces rails, qui pèsent de 35 à 50 kg au mètre courant, se posent sur des traverses en bois ou en métal. Dans les rues à circulation très active, on pose la voie sur une fondation en béton de 15 à 20 cm d'épaisseur et les rails sont maintenus écartés par des entretoises en fer plat logées entre les joints des pavés.

La traction électrique des tramways peut se faire suivant deux modes différents. Dans le premier système, dit *à prise de courant*, l'énergie électrique qui alimente les électromoteurs portés par les voitures est produite par des génératrices installées à poste fixe et le courant est amené aux véhicules par des conducteurs aériens,

[1] Dierman, *Bull. de l'Ass. des Ing. sortis de l'Inst. Montefiore;* T. 5, p. 194.

souterrains ou au niveau de la voie et des contacts glissants. Cette disposition ne diffère d'une transmission électrique ordinaire qu'en ce que l'électromoteur est mobile. Dans le second système, dit *à voitures automotrices*, celles-ci portent une batterie d'accumulateurs.

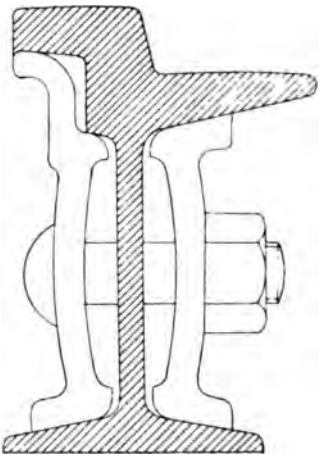

Fig. 2.

Dans les dispositifs de la première catégorie, le retour du courant à l'usine génératrice s'opère ordinairement par les rails. Pour diminuer la chute de tension dans ces conducteurs de retour, ainsi que pour limiter les détériorations que les dérivations de courant peuvent occasionner dans les canalisations de gaz ou d'eau voisines, on réduit, autant que possible, la résistance électrique des rails. Il est important de n'employer que des rails en acier de faible résistibilité, les diverses qualités d'acier présentant des différences notables à cet égard. On estime que les rails pesant 40 kg au mètre et ayant une section de 90 cm² ne doivent avoir qu'une résistance d'environ 0,00041 ohm par km.

Les éclisses qui réunissent les rails présentent avec ceux-ci des contacts insuffisants au point de vue de la conductibilité. On adopte un éclissage électrique supplémentaire, obtenu d'ordinaire au moyen de fils de cuivre fortement serrés dans l'âme des

rails [1]. La fig. 3 représente le joint Thomson-Houston, dont le fil est assujetti dans le rail par un coin à faces coniques enfoncé à

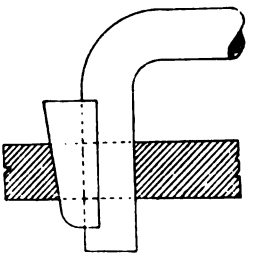

Fig. 3.

refus. Le joint Chicago, fig. 4, donne un meilleur contact : un rivet conique est chassé dans un trou ménagé dans le bout du

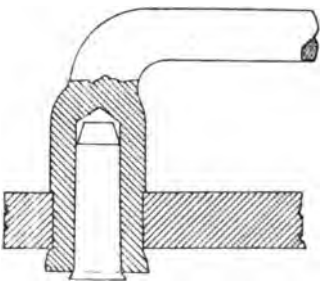

Fig. 4.

conducteur, de manière à écraser ce dernier contre les parois de l'orifice pratiqué dans le rail.

Dans le joint Edison, fig. 5, un amalgame maintenu latéralement par des anneaux de liége est fortement pressé entre l'éclisse et l'âme du rail, bien décapées au préalable. L'amalgame procure un contact très intime et abaisse la résistance du joint jusque 0,00002 ohm. La meilleure solution, malheureusement assez coûteuse, est la

[1] Dawson, *Bull. de l'Ass. des Ing. sortis de l'Inst. Montefiore :* T. 5, p. 277.

soudure directe des tronçons de rails voisins. Cette soudure a été pratiquée aux Etats-Unis sur diverses lignes.

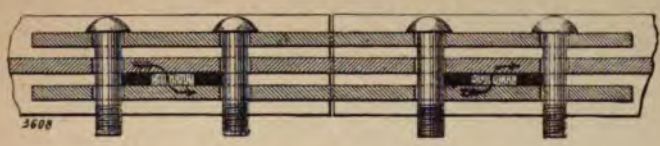

Fig. 5.

La résistance des éclissages électriques doit être vérifiée périodiquement, par exemple en mesurant la différence de potentiel entre les bouts des rails dans lesquels on envoie un courant d'intensité connue. La résistance des joints éclissés bien faits varie de 0,00002 à 0,00005 ohm.

Avec des connexions bien établies, la résistance du retour par des rails pesant P kg au mètre courant ne doit pas être supérieure à

$$\frac{1,64}{P} \text{ ohm.}$$

Les voies des tramways possédant généralement des rails à rainure et les roues des voitures des bandages à bourrelet, le frottement ou glissement du bourrelet contre les parois verticales de la rainure absorbe une fraction notable de l'effort de traction. On remarquera que, comme les roues font corps avec les essieux, il faut nécessairement que, dans les courbes, l'une des roues patine, ce qui entraine un frottement considérable dans les courbes de petit rayon qu'on rencontre fréquemment sur les lignes de tramway. On réduit la résistance dans les courbes en donnant aux boîtes à graisse un léger jeu permettant aux essieux de s'orienter suivant le rayon de courbure et en rapprochant autant que possible les deux essieux d'un véhicule. L'empattement de 1,80 m est souvent adopté.

L'effort de traction varie nécessairement avec le système de voie, le mode d'établissement de celle-ci et l'état des rails. Alors qu'en palier l'effort n'est guère que de 6 kg par tonne sur les chemins de fer à rails saillants du type Vignole, il atteint 12 kg dans les tramways pourvus de rails à rainure au niveau de la chaussée.

Dans les rampes, l'effort de traction s'accroît de la composante parallèle à la voie du poids du véhicule. En appelant α l'angle d'inclinaison de la voie, $\sin\alpha$ représente l'effort supplémentaire, par kilogramme, dû à la pente. Comme les valeurs de α sont généralement faibles, le sinus peut être remplacé par la tangente; il a donc la même expression que la pente par mètre. Ainsi, sur une rampe de 0,04 m par mètre, l'effort de traction supplémentaire est de 0,04 kg par kilogramme.

Il résulte de ce qui précède qu'en désignant par p kg le poids d'un véhicule, par f l'effort de traction par kg en palier, par i la rampe par mètre, l'effort de traction est

$$F = p\,(f \pm i). \qquad (1)$$

le signe — se rapportant au cas d'une pente. Aux vitesses auxquelles roulent les voitures des tramways, il n'est pas nécessaire de tenir compte de la résistance de l'air, qui, avec les locomotives à grande vitesse, est généralement représentée par un terme proportionnel au carré de la vitesse et joue un rôle prépondérant.

Le travail pour une longueur l m parcourue sur une voie uniforme est

$$W = p\,l\,(f \pm i) \text{ kilogrammètres}, \qquad (2)$$

et la puissance requise, en exprimant par v la vitesse en mètres par seconde,

$$P = \frac{p\,v\,(f \pm i)}{75} \text{ chevaux ou } \frac{p\,v\,(f \pm i)}{0,102} \text{ watts}. \qquad (3)$$

Le coefficient de traction f, qui atteint 0,012 dans les voitures automobiles, descend à 0,008 dans les voitures remorquées.

M. Reckenzaun a observé que, dans les courbes de 15 m de rayon, l'effort de traction des véhicules de tramway est doublé et qu'il est triplé dans les courbes de 10 m de rayon.

Au démarrage, l'effort de traction est souvent quadruplé, à cause de l'accroissement des résistances au roulement à la mise en train. Une fois le véhicule en mouvement, l'effort à appliquer est égal à

la résistance normale à la traction augmentée de la force nécessaire pour communiquer à la masse de la voiture l'accélération capable de déterminer la vitesse de régime en un temps donné.

Pour calculer l'effort moyen par kg F', de nature à procurer une vitesse de v mètres par seconde au bout de t secondes, il suffit de remarquer que la force vive $\frac{mv^2}{2}$ est égale au travail $F' \frac{v}{2} t$ produit. Or, pour un kg, la masse m est représentée par $\frac{1}{g}$, d'où

$$F' = 0,102 \frac{v}{t}.$$

Cette formule n'est qu'approchée, car elle suppose que l'accélération est constante pendant la durée du régime variable. Dans les tramways, la durée de l'accélération est de 12 à 18 secondes et les vitesses de régime varient de 12 à 16 km à l'heure ; il faut donc compter sur un effort supplémentaire de 20 à 40 gr. par kg à la mise en train.

Pour obtenir des démarrages rapides et partant des vitesses moyennes élevées, on donne aux moteurs de tramway des puissances exceptionnelles. Un cheval de tramway peut développer momentanément une puissance de 5 chevaux, mais les conditions d'accélération imposées dans la traction électrique nécessitent des moteurs de 20 à 25 chevaux.

Avec les voitures électriques, l'effort moteur peut se calculer d'après l'intensité du courant absorbé par le véhicule, ce qui permet d'éviter des mesures dynamométriques toujours difficiles. On a constaté que le courant est extrêmement variable dans les électromoteurs, par suite des arrêts et des démarrages fréquents, ainsi que des irrégularités de la voie. En portant les intensités en ordonnées et les temps en abscisses, on obtient une ligne dentelée qui se confond avec l'axe des temps sur une partie de son développement, à cause de la durée des arrêts et du fait que la voiture se meut en vertu de son inertie et du travail de la pesanteur sur une fraction du parcours.

L'expérience montre que la plus grande partie de l'énergie électrique dépensée par une voiture est absorbée par les démarrages et les rampes. La proportion était de 80 pour 100 dans une ligne étudiée par M. Hering.

L'*adhérence* d'un véhicule sur la voie résulte de l'engrènement des petites aspérités des bandages des roues avec celles des rails ; elle varie du cinquième au dixième du poids porté par les roues motrices. Il s'ensuit que, si l'effort au démarrage est trop considérable ou si la voie est rendue glissante par la neige durcie ou le verglas, les roues patinent. On évite cet inconvénient par des projections de sable sous les roues.

Les voitures de tramway sont de deux types différents. Les grandes voitures, telles qu'on les emploie sur les lignes importantes, contiennent 50 voyageurs et pèsent une dizaine de tonnes avec le matériel électrique, lorsqu'elles sont remplies. Les petites voitures offrent 30 à 32 places et pèsent 6 à 7 tonnes. Ces poids suffisent, en général, pour donner l'adhérence nécessaire aux roues d'une voiture automobile.

Parfois, lorsque les compagnies de tramways se décident à essayer la traction électrique, elles demandent à employer un véhicule spécial pour le remorquage, afin de n'avoir pas à modifier leur matériel. Il est facile de montrer, par le calcul, combien cette solution est peu avantageuse, eu égard au poids qu'on doit donner au remorqueur pour assurer l'adhérence.

Soit le cas d'une ligne ayant une rampe de 5 cm par mètre ($i = 0{,}05$). Admettons que le coefficient de traction soit $f = 0{,}012$ et le coefficient d'adhérence 0,12.

En désignant par p le poids de la voiture et par p' le poids du remorqueur, on a pour l'effort de traction total

$$F = (p + p')(f + i) = (p + p')\,0{,}062.$$

Pour que le remorqueur puisse entraîner son propre poids et celui de la voiture, il faut que l'adhérence soit au moins égale à l'effort de traction. A la limite, on a donc

$$0{,}12\,p' = 0{,}062\,(p + p'),$$

d'où

$$p' = 1{,}07\,p.$$

On voit que le poids à donner au remorqueur serait supérieur au poids du véhicule, condition tout à fait irrationnelle. S'il y a plusieurs véhicules à remorquer, le mieux est de se servir d'une

voiture automobile assez puissante pour entraîner plusieurs véhicules derrière elle.

On calcule également par la formule précédente la rampe maxima qu'une voiture peut gravir. Soit une voiture automobile à deux essieux moteurs, du poids de p kilogrammes. En appelant x le pour cent de pente maximum, l'on a

$$p\,(0{,}012 + 0{,}01 \times x) = 0{,}12 \times p,$$

d'où $x = 10{,}8$ pour 100.

Moteurs. Trucs. Systèmes Thomson-Houston, Siemens, Oerlikon, Short, Walker. — Nous rappellerons en quelques mots le principe des moteurs à courant continu qui sont les plus employés dans la traction, en renvoyant pour plus de détails aux *Leçons sur l'Électricité*.

Lorsqu'on relie une dynamo à un générateur électrique produisant une différence de potentiel constante, l'on constate que la dynamo prend un mouvement de rotation qui s'accélère jusqu'à ce que l'effort moteur fasse équilibre au couple résistant. En même temps, le courant qui traverse la machine diminue graduellement à mesure que la vitesse augmente, ce qui accuse dans la dynamo le développement d'une force contre-électromotrice croissante.

Les machines à courant continu sont donc réversibles; elles peuvent être utilisées aussi bien pour la transformation de l'énergie électrique en énergie mécanique que pour la production de l'effet inverse.

Afin de rendre compte du mouvement de l'armature d'un électromoteur, considérons une dynamo à induit annulaire et à excitation en série, fig. 6. Le courant envoyé dans la machine produit dans les inducteurs un flux de force magnétique traversant l'armature dans la direction N S. Chaque spire de l'induit est sollicitée à se déplacer de manière à embrasser le plus grand flux de force possible par sa face négative. Les spires situées dans le quadrant A reçoivent le flux par la face négative; elles tendent à se mouvoir en sens inverse du mouvement des aiguilles d'une montre, de manière à rendre maximum le flux qui les traverse. Les spires du quadrant D, qui embrassent au contraire les lignes

de force par la face positive, tournent dans le même sens afin de provoquer une diminution du flux qui les traverse. En raisonnant de même pour les deux autres quadrants, il est aisé de voir que l'induit prend un mouvement de rotation précisément inverse de celui qu'on doit donner à la machine, fonctionnant comme géné-

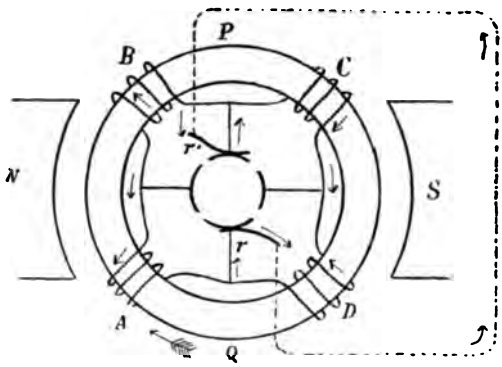

Fig. 6.

ratrice, pour lui faire produire le même courant. Ce fait découle directement de l'application de la loi de Lenz. Il est du reste commun à toutes les dynamos à courant continu, quels que soient le mode d'excitation des inducteurs et le système d'enroulement de l'induit.

Si l'on désigne par i le courant qui se bifurque en deux parties égales dans l'induit à anneau d'une machine bipolaire et par $\mathfrak{N}$ le flux magnétique total à travers l'armature, le travail accompli par une spire pendant une révolution autour de l'axe est exprimé par

$$\frac{i}{2} \times 4 \frac{\mathfrak{N}}{2} = i\,\mathfrak{N}.$$

S'il y a n fils à la périphérie de l'induit tournant à raison de N tours par seconde, la puissance développée est

$$p = i\,n\,\mathrm{N}\,\mathfrak{N}. \qquad (1)$$

Or

$$n\,\mathrm{N}\,\mathfrak{N} = e. \qquad (2)$$

e représentant la force électromotrice d'induction engendrée par la rotation de l'armature dans le champ des inducteurs.

La puissance p a donc aussi pour expression

$$p = e\,i. \qquad (3)$$

En vertu du principe de la conservation de l'énergie, la force électromotrice e est nécessairement de sens opposé à la différence de potentiel appliquée à l'électromoteur. Si l'on désigne celle-ci par E et la résistance de la machine par r, on a

$$i = \frac{E - e}{r}. \qquad (4)$$

Soit C le couple développé sur l'arbre du moteur. Le travail par tour est 2π C et la puissance utile 2π C N. En négligeant les frottements mécaniques et magnétiques de la machine, ainsi que les courants de Foucault, on peut écrire l'égalité

$$2\pi\,C\,N = i\,n\,N\,\mathfrak{M}$$

d'où

$$C = \frac{i\,n\,\mathfrak{M}}{2\pi}. \qquad (5)$$

Si l'on impose des valeurs à deux des cinq quantités C, i, E, e, N, reliées par les équations (2), (4), (5), les trois autres quantités prennent des valeurs déterminées, car r et n sont des constantes dans une machine donnée et le flux $\mathfrak{M}$ est lié invariablement à l'intensité du courant. Ainsi, lorsqu'on règle le couple résistant, par exemple à l'aide d'une charge donnée à un frein de Prony placé sur la poulie du moteur, ainsi que la différence de potentiel E, aussitôt le nombre de tours, l'intensité du courant et la force contre-électromotrice acquièrent des valeurs définies.

L'équation (5) montre que, dans l'hypothèse où les effets parasites sont nuls dans une machine en série, le couple moteur est indépendant de la vitesse et ne dépend que de l'intensité du courant.

Dans leur application aux tramways les moteurs électriques sont soumis à des régimes de vitesse et de couple variables, interrompus par des arrêts plus ou moins prolongés. On ne peut pas alors caractériser ces machines par leur puissance normale ;

il faut spécifier le couple et la vitesse qu'elles sont capables de fournir.

Dans un moteur de tramway qui attaque, par un engrenage dont le rapport de réduction est A, un essieu dont les roues ont r m de rayon, le couple C est exprimé, en fonction de l'effort, f kg, à la jante, par

$$C = \frac{rf}{A} \text{ kilogrammètres.}$$

C'est par l'effort à la jante que les moteurs de tramway sont souvent désignés. Le couple dépend, comme on l'a vu ci-dessus, du flux utile et des ampères-tours de l'induit, c'est à dire du flux et de la section totale de cuivre sur l'armature. On modifie la vitesse en répartissant cette section totale entre un nombre de conducteurs plus ou moins grand.

Les moteurs électriques ont une élasticité qui les rend particulièrement propres à la traction des véhicules. Admettons qu'une voiture soit mue par un électromoteur alimenté par un courant continu, sous une tension constante. C'est au démarrage que l'effort de traction est le plus grand ; or, à ce moment, l'électromoteur est au repos, le courant fourni par le générateur atteint sa plus haute valeur et le couple moteur est maximum. L'effort ainsi développé est susceptible d'atteindre une valeur très supérieure à celle de l'effort normal, ce qui n'est pas le cas pour les autres moteurs, tels que la machine à vapeur dans laquelle la force exercée sur le piston dépend de la pression à la chaudière. Lorsque le véhicule se met en marche, le courant faiblit et la puissance fournie par le générateur diminue à mesure que la vitesse croît. Quand la voiture descend une pente sous l'action de la gravité seule, l'on interrompt généralement le circuit. Mais rien ne s'oppose, si l'électromoteur est excité en dérivation, à ce qu'on utilise l'énergie développée pour charger des accumulateurs ou alimenter d'autres moteurs fonctionnant sur la même ligne. Dans les deux cas, l'électromoteur fait fonction de frein et le travail de la pesanteur est absorbé sans amener l'usure des roues, comme cela arrive avec les freins ordinaires qui agissent sur le frottement de sabots sur les bandages ou, ce qui est pire, par le glissement des roues sur les rails.

Pour changer le sens de marche, l'on renverse le courant dans l'induit, ce qui occasionne des réactions d'extra-courant moindres que si l'interversion avait lieu dans les inducteurs. Afin de ne pas avoir à modifier la position des balais, on adopte des frotteurs en charbon fixés d'une manière invariable à la ligne de symétrie des pôles et on leur donne une forme telle que le collecteur puisse tourner dans les deux sens. Il va sans dire que, malgré l'emploi de moteurs à faible réaction d'induit, ce procédé suscite des étincelles qui éclatent surtout lors des variations brusques du courant, comme il s'en produit aux arrêts et aux changements de marche.

Afin de diminuer les réactions de self-induction lors des ruptures du circuit, on a soin d'affaiblir graduellement le courant qui alimente l'électromoteur par l'insertion de résistances artificielles.

Les mêmes résistances permettent de faire varier la différence de potentiel appliquée à l'électromoteur pour modifier le couple de la machine électrique, ainsi que pour éviter la production d'un courant trop intense lors du démarrage. En vue de diminuer l'importance du rhéostat, qui détermine une perte d'énergie en chaleur parfois assez considérable, il est possible d'agir en même temps sur l'excitation des inducteurs : on divise les bobines magnétisantes en 2 ou 3 sections pouvant être associées en série ou en dérivation. En outre, si la voiture porte 2 moteurs, ceux-ci peuvent être associés en série au démarrage, puis en parallèle lorsque les forces contre-électromotrices ont atteint une valeur suffisante.

L'enroulement en dérivation des inducteurs est employé dans les voitures à accumulateurs lorsqu'on veut récupérer de l'énergie dans les pentes. On l'utilise peu dans les tramways à prise de courant, bien qu'il soit auto-régulateur de vitesse. Cette défaveur tient à ce que les inducteurs en dérivation, enroulés pour 500 volts, sont chers, difficiles à isoler et donnent lieu à des réactions de self-induction dangereuses. En outre, toute baisse de voltage sur la ligne agit à la fois sur le flux et sur le courant d'induit, et amène une notable réduction du couple moteur. On a, cependant, appliqué les moteurs shunt dans les locomotives électriques et sur des chemins de fer de montagne, où l'auto-régulation de vitesse et la récupération sont des qualités précieuses.

La fig. 7 représente, pour chacune des intensités du courant qui traverse l'induit d'un moteur de tramway excité en dérivation, la puissance dépensée et recueillie, le rendement, l'effort à la jante des roues actionnées et la vitesse linéaire de cette jante. Ces courbes caractérisent complètement les qualités du moteur.

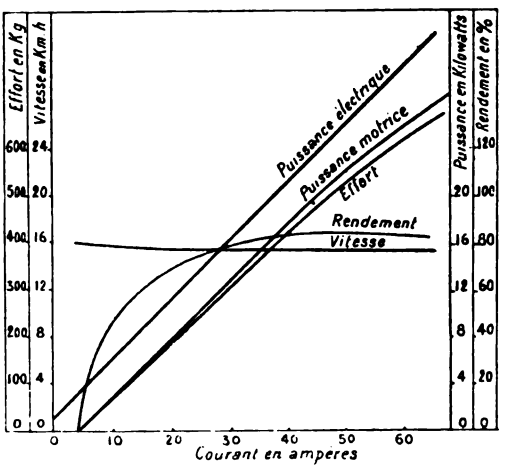

Fig. 7.

L'enroulement en série est le plus usité pour les moteurs des voitures automobiles. C'est celui qui donne l'effort maximum au démarrage, lequel est possible même en cas de forte baisse de la tension sur la ligne. Il occasionne moins d'étincelles au balais que les autres modes d'excitation, grâce au peu de variation du rapport des ampères-tours induits aux ampères-tours inducteurs.

La fig. 8 montre les courbes caractéristiques d'un moteur de tramway de 20 kilowatts normaux excité en série, en fonction du courant absorbé. On remarquera que, puisque la vitesse augmente à mesure que le couple décroît, le moteur en série est, en quelque sorte, auto-régulateur de puissance. [1]

[1] Blondel et Dubois, *La Traction électrique*; Paris, Baudry, 1899.

Par suite du renversement de polarité des électro-aimants, le moteur en série ne peut pas renvoyer du courant dans la distribution ; mais on peut le faire servir de frein en le reliant à un circuit local, constitué par les résistances de démarrage.

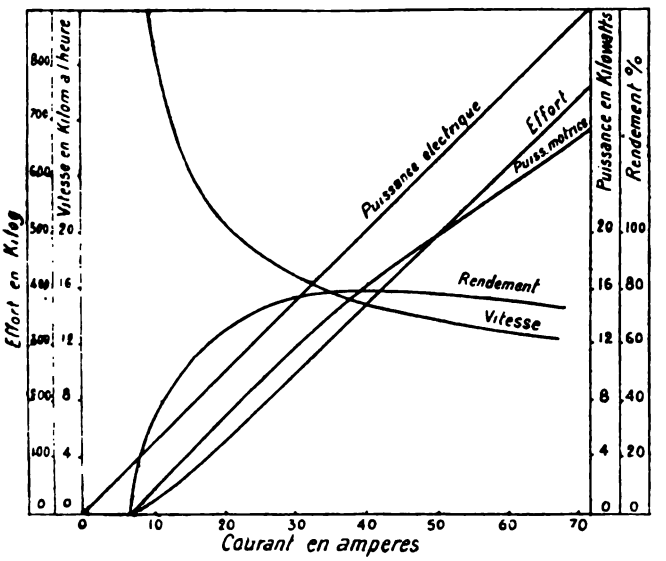

Fig. 8.

On adopte ordinairement les induits à tambour, qui ont une réaction moindre et un meilleur rendement que les induits à anneau. On utilise des dispositions, telles que celles d'Eickemeyer ou de Lahmeyer [1], pour faciliter l'enroulement et les réparations de l'armature, qui est la partie la plus sujette à dérangements de la machine.

Les moteurs des tramways, qui sont soumis à des vibrations et des chocs violents, ont généralement des induits dentés ; les arbres et les paliers présentent une solidité exceptionnelle. Les lames du collecteur doivent être très nombreuses pour réduire les étincelles

[1] Eric GERARD, *Leçons sur l'Électricité* ; chap. XLI, t. I.

aux balais. Le nombre des rainures du noyau de l'induit est limité en enroulant plusieurs sections dans une rainure.

Les inducteurs sont ordinairement tétrapolaires et leurs bobines sont enveloppées d'une toile imperméable. On protège l'induit contre les boues de la voie par la forme donnée aux inducteurs. Il convient d'éviter les pôles saillants qui pourraient attirer les clous ou autres objets en fer tombés sur la voie. Dans la plupart des moteurs de tramway, la carcasse des inducteurs enferme hermétiquement l'induit, d'où le nom de moteurs cuirassés.

Dans les voitures automobiles, le poids des voyageurs donne l'adhérence nécessaire aux roues motrices. Sur les lignes à profil peu accidenté, un des essieux reçoit le mouvement d'un moteur. Lorsque les rampes dépassent 5 mm par mètre, on attaque chacun des essieux par un électromoteur, ce qui fournit une adhérence plus grande et permet de développer des efforts de traction suffisants pour gravir de fortes rampes.

Par suite de la fréquence des arrêts des tramways urbains, les démarrages doivent être rapides pour atteindre la vitesse moyenne de 12 km à l'heure. C'est pourquoi l'on a renforcé progressivement la puissance des moteurs et l'on est arrivé à adopter des types capables de développer jusque 25 et même 40 chevaux sur certaines lignes. Toutefois, le travail des électromoteurs étant très variable dans les tramways, il suffit que les appareils puissent fournir cette puissance pendant quelques minutes. Sur les lignes suburbaines et interurbaines, où la vitesse est plus grande, on a employé des moteurs d'une puissance atteignant jusque 50 et 100 chevaux.

Les moteurs de tramway sont surtout caractérisés par le couple qu'ils sont susceptibles de développer : les moteurs de tramway usuels procurent 30 kgm sur leur arbre ; ils pèsent 25 à 30 kg par kgm.

Le couple moteur est limité par l'échauffement des conducteurs de la machine et le fonctionnement du collecteur. On peut distinguer, dans un moteur, le régime normal, qu'il doit pouvoir supporter pendant 2 à 3 heures de suite, le régime forcé qui peut durer 1 heure et le régime accidentel limité à 1 minute.

Les essais auxquels on soumet les moteurs de tramway sont très rigoureux, à cause des conditions exceptionnelles dans lesquelles

ces appareils doivent fonctionner. C'est ainsi qu'on essaie leur isolement sous des tensions alternatives efficaces allant jusque 4 000 volts. Leur rendement aux divers régimes est mesuré en comprenant les pertes dans les engrenages.

En ce qui concerne le mode de fixation des moteurs, le seul système rationnel consiste à séparer complètement la construction de la caisse de la voiture de celle du truc destiné à la supporter et à fixer à ce dernier le moteur et les transmissions. La caisse se pose alors sur le truc par un intermédiaire élastique, tel que des ressorts en acier ou en caoutchouc. De cette manière, un accident à l'appareil électrique ne nécessite que le remplacement du train des roues et non celui de la voiture entière; il suffit de soulever la caisse du véhicule rentré au dépôt pour substituer au truc détérioré un truc de rechange. Enfin, le même mécanisme sert, l'hiver, pour les caisses fermées et, l'été, pour les caisses ouvertes.

Le truc comprend un chassis rigide formé de deux longerons reliés par des traverses et portant des plaques de garde, dans lesquelles coulissent les boîtes à graisse qui entourent les fusées des essieux. Les boîtes à graisse ont un léger jeu, afin de faciliter le passage des voitures dans les courbes. Si celles-ci ont 20 m de rayon, l'empattement doit être réduit à 1,80 m, ce qui entraîne un balancement de la voiture auquel on a porté remède en faisant reposer l'avant et l'arrière sur des ressorts visibles dans le truc Peckham, représenté dans la fig. 9. Les ressorts à lames de ce truc jouent seuls lorsque la voiture est faiblement chargée; les ressorts à boudin fonctionnent sous les fortes charges.

Le truc appuie sur les boîtes à graisse par des ressorts; de cette manière, les vibrations occasionnées par le roulement sont amorties par un double intermédiaire élastique et ne peuvent incommoder les voyageurs. En outre, on évite ainsi le martelage de la voie lors du passage de la voiture sur les joints des rails.

L'exiguité de l'emplacement des électromoteurs sous les voitures nécessite l'emploi de dynamos à induit de faible diamètre et, par suite, à grande vitesse angulaire. Avec les inducteurs bipolaires, la vitesse n'est guère inférieure à un millier de tours par minute. Comme les roues des voitures des tramways urbains ont 0,75 à 0,85 m de diamètre et font 100 à 120 révolutions dans le

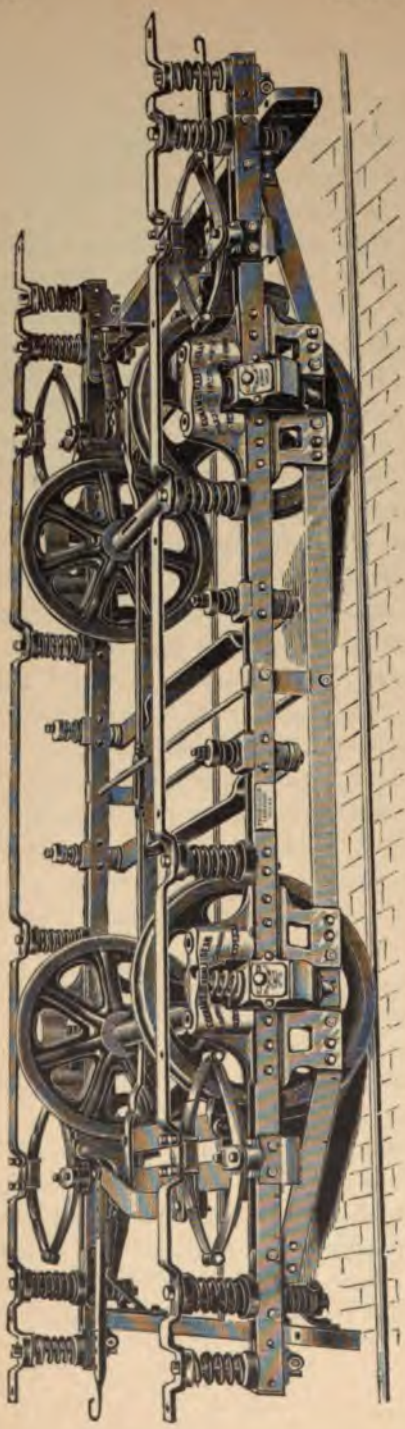

Fig. 9.

même temps, les machines bipolaires exigent une réduction de vitesse dans le rapport de 10 à 1. Cette réduction s'obtient facilement en munissant l'essieu d'une roue héliçoïdale attaquée par une vis tangente portée par l'arbre du moteur. Avec une vis en acier poli à 3 filets et une roue en bronze phosphoreux baignant dans une cuvette d'huile, M. Reckenzaun est arrivé à un rendement de 0,85 pour une telle transmission.

Ce rendement est obtenu grâce à la grande vitesse linéaire de la vis, laquelle est de 10 à 12 mètres par seconde. Le pas doit être assez allongé pour que la roue puisse mener la vis dans les descentes, lorsque le courant est supprimé. L'angle de la denture de la vis atteint 45° et occasionne une poussée longitudinale exigeant l'emploi de plateaux de butée à chaque bout.

La chaîne est parfois utilisée lorsqu'avec un seul moteur on veut attaquer les deux essieux de manière à faire contribuer tout le poids de la voiture à l'adhérence. Ce système de transmission a un ren-

dement voisin de 0,90. Il a l'inconvénient d'exposer à des réparations fréquentes.

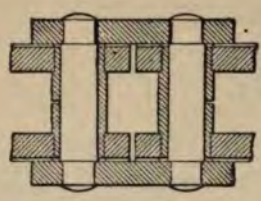

Fig. 10.

La fig. 10 montre la construction de la chaîne Reynolds, l'un des modèles les plus solides que l'on emploie.

La plupart des constructeurs préfèrent recourir aux transmissions par engrenages cylindriques, qui sont plus efficaces et moins sujettes à usure, mais qui, avec des moteurs à 1 000 tours, exigent une *double réduction de vitesse*, c'est à dire un arbre intermédiaire.

On adopte fréquemment les rapports de vitesse suivants entre l'essieu, l'arbre intermédiaire et l'arbre moteur, 1 : 3 : 12. Vu le faible diamètre des roues dentées, le pignon du moteur est très restreint et subit une usure assez rapide qui engendre des chocs et un bruit désagréable. Pour diminuer le bruit, on enferme les engrenages dans une caisse contenant de l'huile dans laquelle plonge la partie inférieure des roues. On peut aussi employer des pignons en cuir soutenus entre des joues métalliques, mais ces organes sont moins solides.

Le moteur doit être pourvu d'une suspension flexible pour éviter les chocs trop brusques et les bris de dents d'engrenage. Dans ce but, la carcasse est portée, d'une part par des coussinets appuyant sur l'essieu, d'autre part par des ressorts fixés au truc. Aux moments du démarrage et de l'arrêt, ces ressorts se tendent ou se compriment, ce qui donne de la douceur à la transmission.

Cependant, ce système laisse encore à désirer : le moteur portant rigidement sur l'essieu, celui-ci subit un martelage continu au passage des joints des rails. On évite cet inconvénient dans les trucs récents, soit en appuyant le moteur sur l'essieu par un intermédiaire élastique, soit en suspendant le moteur par son centre de

gravité à une traverse soutenue elle-même par des ressorts qui amortissent les chocs dus à la masse de la machine.

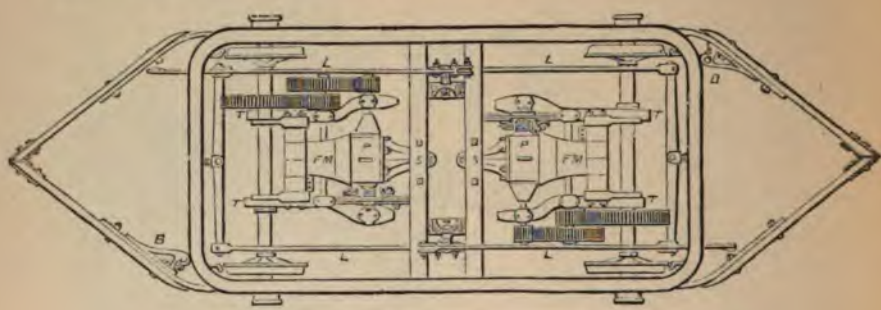

Fig. 11.

La fig. 11 représente le premier modèle de truc de la voiture Thomson-Houston. Les deux essieux sont attaqués séparément par des moteurs P, P, associés en parallèle. Le cadre qui sert d'appui aux traverses soutenant les moteurs porte des chasse-corps en forme de coins. En B se placent des brosses verticales en fils d'acier glissant dans des rainures et appuyant par leur poids sur les rails, de manière à nettoyer ceux-ci. Les tringles L servent à la manœuvre des freins.

Le bâti qui soutient l'arbre du moteur et l'arbre intermédiaire est coulé en une seule pièce. Il est supporté, d'un côté par l'essieu, de l'autre, par quatre ressorts en caoutchouc, entre deux traverses A disposées entre les essieux, fig. 12. On ménage ainsi dans la trans-

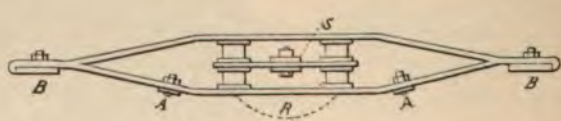

Fig. 12.

mission l'élasticité nécessaire pour que les variations brusques de l'effort résistant et de l'effort moteur ne déterminent pas le bris des dents des engrenages.

Dans ce modèle, les moteurs étaient pourvus de pôles saillants susceptibles d'attirer les objets en fer tombés sur la voie. De plus,

l'emploi de l'arbre intermédiaire amenait des complications et des pertes. Actuellement la Compagnie Thomson-Houston, comme la plupart des constructeurs de tramways, utilise des moteurs cuirassés, à inducteurs tétrapolaires, tournant à 500 tours par minute

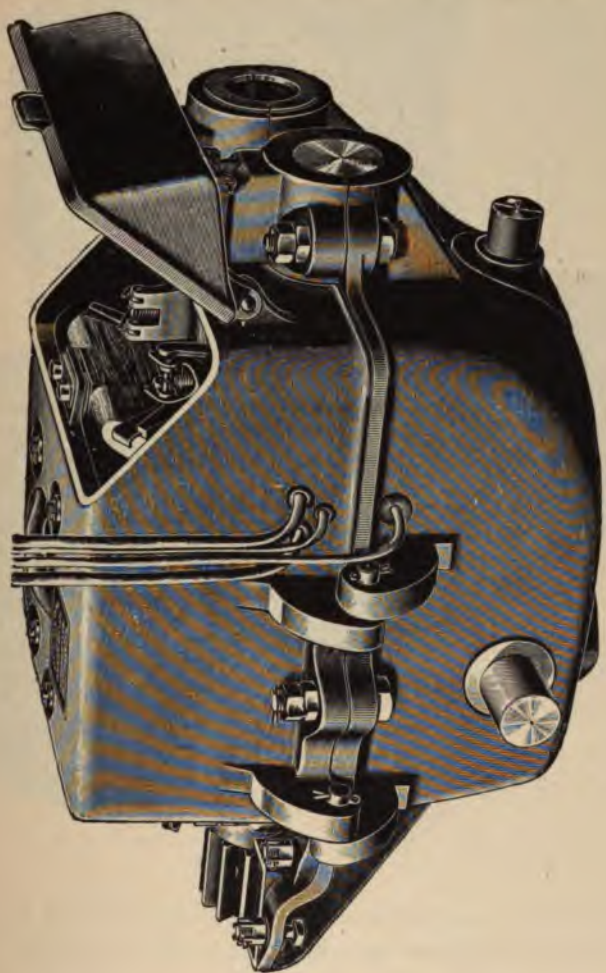

Fig. 13.

et qui permettent d'attaquer les essieux par une *simple réduction de vitesse*.

Les fig. 13 et 14 montrent en perspective et les fig. 15 et 16

en coupe et en plan le moteur G. E. 800 de la Compagnie Thomson-Houston.

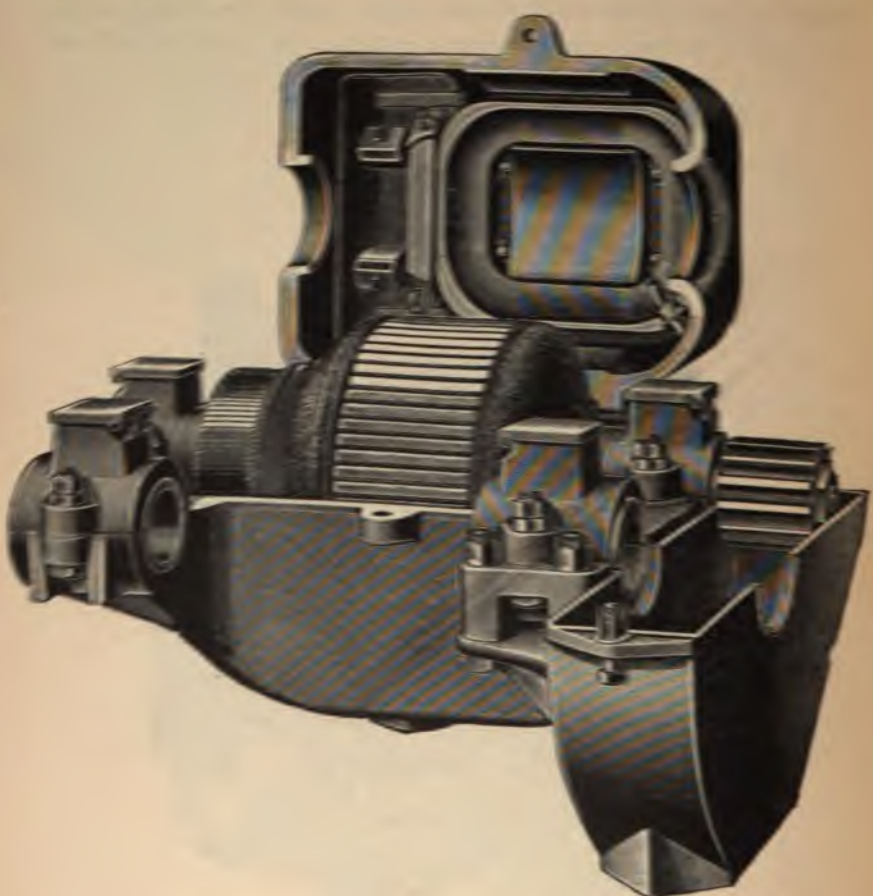

Fig. 14.

La machine est complètement enfermée dans une caisse en acier coulé servant de carcasse aux inducteurs. La boîte peut s'ouvrir en deux parties mobiles sur charnières, pour l'examen de l'induit. La visite du collecteur se fait par une trappe auxiliaire ouverte dans la fig. 13.

L'induit denté est pourvu d'un enroulement à tambour en tension,

réduisant à deux le nombre des frotteurs en charbon, qui sont calés à 90° à la partie supérieure du collecteur. Il est enroulé pour 500 volts et comporte 105 encoches recevant autant de bobines préparées sur calibre et renfermant chacune 3 fils en hauteur, de sorte qu'il y a 6 fils par encoche. Les extrémités des bobines

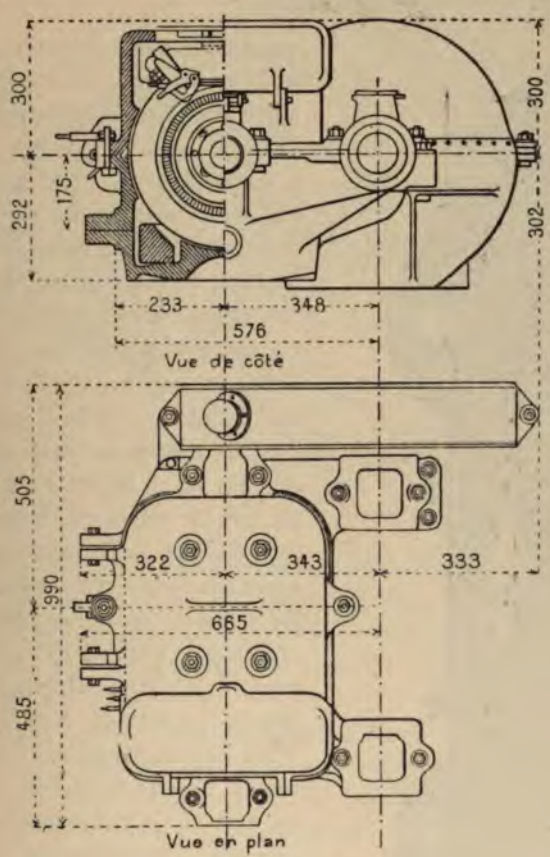

Fig. 15 et 16.

s'étalent de chaque côté sur des portées coniques, raccordées au noyau. On les recouvre de pièces d'acier coniques, vissées aux susdites portées, de manière à former un tout rigide enveloppé d'une toile imperméable maintenue par des frettes.

L'inducteur tétrapolaire comporte deux bobines excitatrices

seulement. Ces bobines, enveloppées de toile imperméable, sont intercalées entre l'induit et le retour par les rails; de cette manière, l'on diminue autant que possible la différence de potentiel entre ces bobines et la terre et l'on restreint les dérivations lorsque les fils de connexion sont en communication avec la masse par l'humidité.

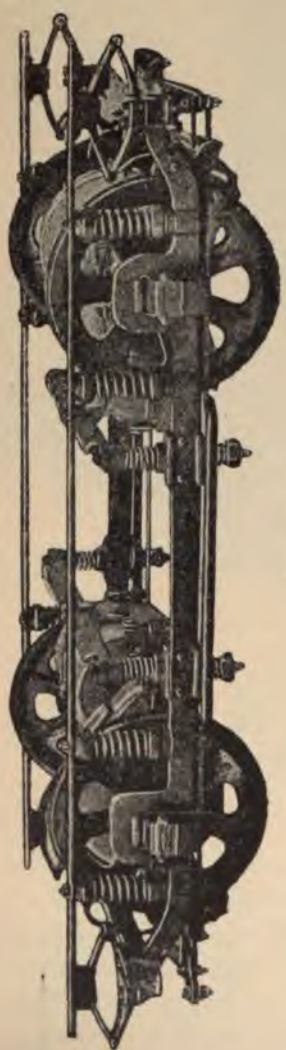

Fig. 17.

L'entrefer est réduit à 3 mm. Le moteur attaque par un pignon en acier une roue en fonte fixée sur l'essieu. Les dents sont fraisées. L'engrenage est protégé contre la boue par une caisse contenant, à la partie inférieure, de l'huile dans laquelle plonge le bas de la roue. On assure ainsi une lubrification continue des engrenages et l'on diminue leur sonorité. Le moteur est capable, lorsqu'il est traversé par le courant normal, d'un effort de 360 kg à la jante de roues de 84 cm de diamètre. Il peut développer une puissance de 25 chevaux avec un rendement industriel de 82 pour 100. Le poids se décompose comme suit : induit avec pignon, 232 kg ; bobines des inducteurs, 70 kg ; carcasse, 289 kg ; boîte de l'engrenage, 45 kg ; accessoires, 24 kg ; roue dentée, 100 kg ; en tout 760 kg. La machine porte par des coussinets sur l'essieu et par des tampons en caoutchouc sur une traverse du truc. On fait en sorte que ce dernier supporte la plus grande partie du poids pour diminuer l'usure des coussinets de l'essieu.

Le moteur Walker, que la fig. 17 représente sur son truc et dont la fig. 18 montre une vue de détail, se caractérise par une double suspension à ressorts. Non seulement le moteur repose par un appui élastique sur le truc, mais il porte sur le coussinet de l'essieu

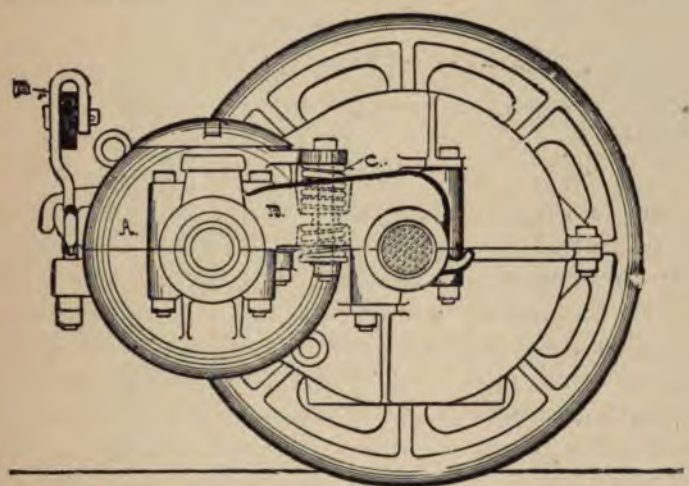

Fig. 18.

par des ressorts à boudin C. De cette manière, l'appareil n'éprouve ni chocs ni secousses du fait des inégalités de la voie et l'on évite le martelage au passage des joints des rails. Les coussinets du moteur sont en saillie sur la carcasse et l'huile ne peut ainsi souiller les enroulements.

Les fig. 19 et 20 montrent une coupe transversale et une coupe longitudinale du moteur de tramway Siemens. L'inducteur tétrapolaire est pourvu de 2 bobines excitatrices. L'induit, enroulé pour 500 volts et développant, à 530 tours, une puissance de 15 chevaux, est rainuré de 87 encoches recevant 261 tours de fil de 3,2 mm sur 1,3 mm. La résistance entre balais est 0,3 ohm à 15° C. Les inducteurs présentent, avec 560 tours de fil de 4,5 mm de diamètre, une résistance de 0,7 ohm. La carcasse des inducteurs s'ouvre diagonalement sur une charnière.

La fig. 21 est une vue perspective du moteur à carcasse démontable de la Société d'Oerlikon.

Si l'on compare les rendements combinés des moteurs et de leurs transmissions, obtenus avec les divers systèmes de réduction de vitesse employés dans les tramways, on arrive aux résultats suivants:

	Poids du moteur avec transmission.	Rendement combiné.
Engrenage double.	500 — 900 kg	75 pour 100
Engrenage simple.	500 — 750	80
Engrenage à vis.	600 — 700	70

Lorsque la vitesse moyenne des voitures peut atteindre 20 à 25 km à l'heure, l'on a essayé d'éviter toute réduction de vitesse en plaçant directement l'induit sur l'essieu. Ce système conduit, même avec des machines multipolaires, à des moteurs lourds, coûteux et d'un rendement défectueux. Aussi y a-t-on renoncé dans les tramways pour ne le conserver que dans quelques locomotives électriques à grande vitesse. Dans les locomotives des lignes suburbaines et interurbaines, on préfère la simple réduction de vitesse, qui permet l'emploi de moteurs économiques d'un type unique, la vitesse pouvant être variée dans les applications par changement du rapport de réduction des engrenages.

L'armature ne peut pas être fixée d'une manière rigide sur l'essieu, comme on l'a fait à tort dans les premières locomotives du City and South of London Railway, car les vibrations désorganisent rapidement les machines.

Voici la disposition imaginée par M. Raffard et appliquée par M. Short aux moteurs *sans réduction de vitesse*, fig. 22.

Le moteur repose sur deux traverses du truc par des tampons en caoutchouc. L'arbre de l'induit, porté par des paliers fixés à la carcasse, est creux, ainsi que le montre la coupe. Il est traversé par l'essieu et relié aux roues par des ressorts qui transmettent l'effort en adoucissant les chocs. L'induit, formé par un anneau denté de section carrée, tourne entre des pièces polaires disposées en regard. Le noyau de l'armature est constitué par un ruban en fer enroulé et fraisé latéralement pour recevoir les sections de l'induit. L'emplacement latéral des pôles évite le frottement contre l'armature, en cas d'usure des paliers. Il permet, en outre, d'agrandir le

diamètre de l'anneau et de réduire la vitesse angulaire. Ce genre de machines ne présente pas la sécurité des moteurs waterproof.

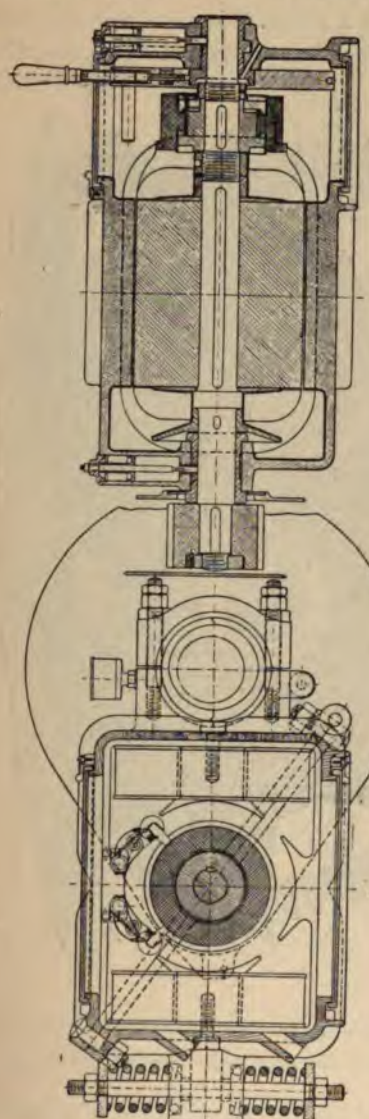

Fig. 20.

Fig. 19.

Dans tous les moteurs de tramway, la lubrification se fait par des graisseurs à mèche ou à graisse solide. Les graisseurs à bagues cessent parfois de fonctionner par suite de l'arrêt des bagues sous l'influence des secousses de la voiture.

Equipement et conduite des voitures.—Suivant l'importance du trafic de la ligne, l'on emploie pour les tramways de petites voitures à 32 places ou de grandes voitures à 50 places. Ces véhicules pèsent respectivement 7 et 10 tonnes avec leur charge et leur équipement électrique. Les voitures à impériale sont peu recommandables à cause du courant d'air occasionné par la vitesse des véhicules électriques et surtout de la durée des arrêts nécessaire pour l'ascension et la descente des esca-

liers. Les essieux indépendants ont un empattement de 1,80 m à 2,50 m. La première dimension permet de passer dans des courbes dont le rayon descend à 16 m. Pour des rayons moindres, il faudrait faire usage d'essieux convergents. On pourrait aussi

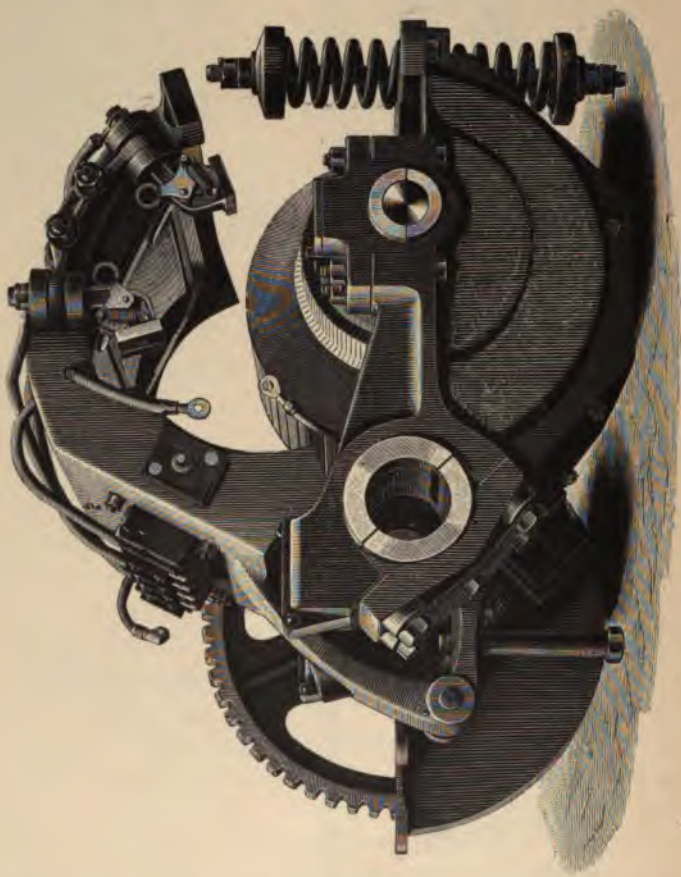

Fig. 21.

utiliser les trucs à bogies, mais ceux-ci sont ordinairement réservés aux longues voitures automobiles des voies secondaires et métropolitaines.

Nous avons dit que les caisses des voitures reposent sur un truc, formé d'un bâti rectangulaire en acier, par l'intermédiaire de boudins ou de ressorts plats.

Par suite de l'allure rapide des voitures de tramway, des accidents sont à craindre. Pour les éviter, on emploie sous le truc des

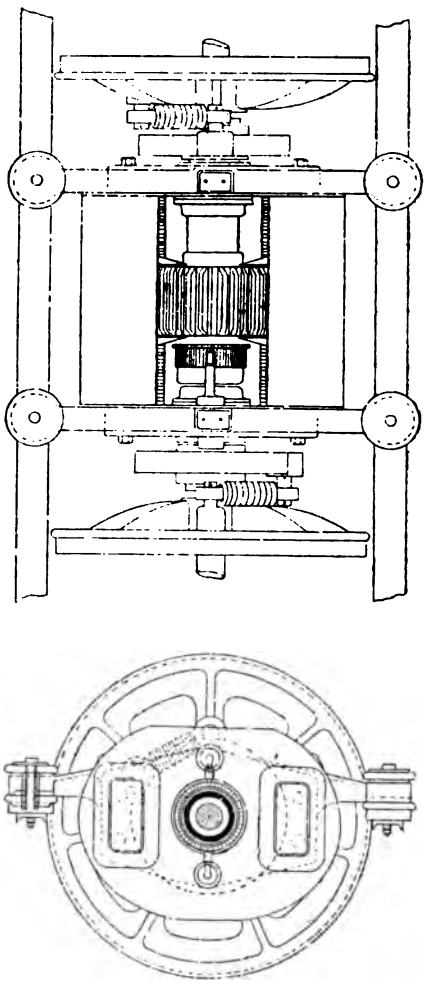

Fig. 22.

chasse-corps formés d'un châssis triangulaire en bois prolongé par des filets protecteurs sur les côtés. Sur quelques lignes on ajoute, en

outre, en saillie au bas de la voiture, des filets tendus sur des cadres garnis de bourrelets en caoutchouc, qui recueillent les personnes tombées sur la voie.

Les voitures électriques sont munies des freins à patin ou à collier ordinairement employés dans les tramways. En outre, en cas de danger, on peut intervertir le courant dans les induits de manière à obtenir un brusque renversement de marche des moteurs ou encore mettre les moteurs en circuit sur les résistances de démarrage ; ces deux méthodes d'arrêt rapide fatiguent beaucoup les induits et ne doivent être employées qu'en cas de nécessité absolue. S'il y a deux moteurs, on peut aussi les mettre en opposition, afin de faire fonctionner l'un comme machine génératrice et l'autre comme machine réceptrice grâce aux légères différences de leurs forces électromotrices, et absorber ainsi rapidement la force vive du véhicule ; mais le fonctionnement est assez aléatoire. Le meilleur des systèmes est le frein électromagnétique, qui repose sur le principe de l'embrayage de Bovet [1]. La bobine du frein Sperry est noyée dans l'électro-aimant par un alliage non magnétique, de manière à être soustraite aux poussières. Pour freiner, on ferme le circuit des moteurs sur cette bobine. La partie de l'électro-aimant fixée à l'essieu attire celle attachée au truc, ce qui détermine un frottement d'autant plus fort que la vitesse du véhicule et par suite le courant sont plus grands. Ce système fonctionne si même la liaison de la voiture avec la ligne électrique est interrompue. Une voiture automobile peut freiner des voitures de remorque. Il faut toutefois des freins à sabot pour maintenir les véhicules sur les pentes, lorsque les moteurs sont arrêtés.

On pourrait rendre le freinage automatique par l'emploi de ressorts maintenant les freins serrés, le desserrage se faisant par un courant emprunté à la ligne.

Sur chacune des plates-formes d'une voiture automobile, il y a un contrôleur et un levier de manœuvre du frein. On munit les organes électriques de clefs à enlever ou de pièces de sûreté, pour

---

[1] Eric Gerard, *Leçons sur l'Électricité;* chap. XXV, t. II.

éviter que les voyageurs ne fassent de fausses manœuvres sur la plate-forme d'arrière.

Les manœuvres qui se font au moyen du contrôleur sont le démarrage, l'accélération et le ralentissement de vitesse, l'arrêt et le renversement de marche ou la mise en activité du frein électromagnétique.

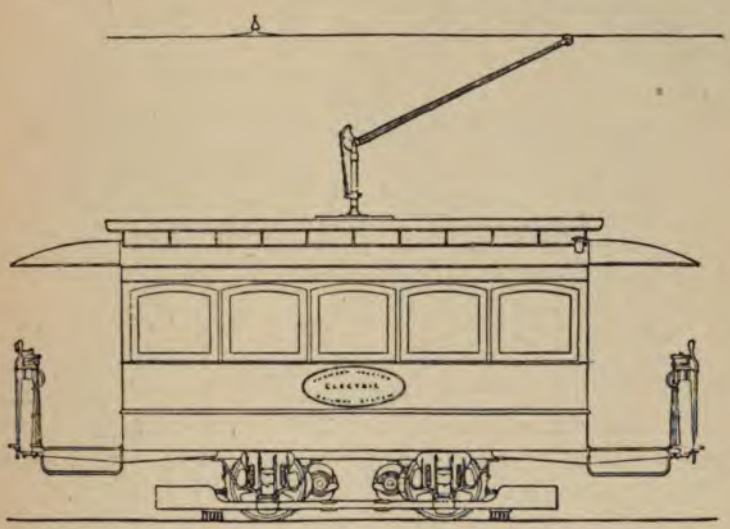

Fig 23.

La fig. 23 représente une vue d'ensemble d'une voiture à prise de courant aérienne du premier système Thomson-Houston.

Cette voiture porte deux moteurs associés en parallèle. Le courant arrivant du galet mobile traverse un coupe-circuit fusible à rupture magnétique d'étincelle, qui interrompt le courant lorsque celui-ci dépasse l'intensité limite. Le circuit est raccordé à un parafoudre pour éviter que les moteurs et les appareils de réglage ne soient détériorés par des décharges atmosphériques. Le courant traverse ensuite les armatures des moteurs, un rhéostat de réglage de la vitesse, un inverseur de courant, les inducteurs et gagne la terre par l'intermédiaire des essieux, des roues et des rails.

Le rhéostat, fig. 24 et 25, est placé sous la voiture et se manœuvre des plates-formes par des cordes passant sur le tambour D. On

déplace ainsi un bras portant un ressort S qui appuie le frotteur O sur les blocs de contact disposés en arc de cercle. Ces blocs font saillie et sont reliés par des lames de fer repliées en zigzag et isolées par des bandes de mica.

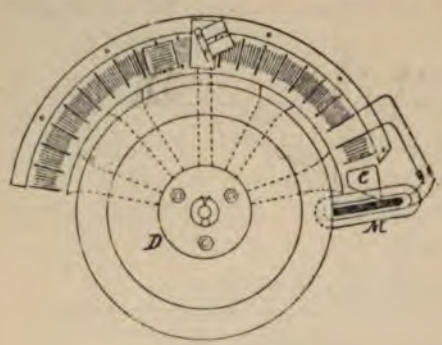

Fig. 24.

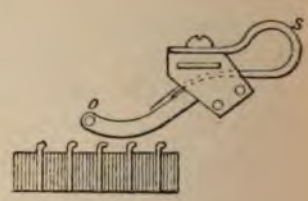

Fig. 25.

Le bras de contact interrompt le courant lorsqu'il arrive à l'une des extrémités de sa course. A ce moment, le courant traverse un électro-aimant M, dont l'action magnétique a pour effet de briser l'étincelle de rupture éclatant à l'extrémité de la pièce C.

L'inconvénient du système précédent est de donner lieu à une grande dépense d'énergie électrique dans le rhéostat. Dans les voitures à 1 moteur, on a pu réduire beaucoup le rhéostat en constituant le circuit d'excitation par des sections qui peuvent être mises en série au démarrage, puis groupées en parallèle. On enroule un nombre relativement grand de spires sur les inducteurs, de manière qu'il suffise d'un courant faible pour donner aux noyaux une aimantation normale.

Dans les voitures à 2 moteurs, on utilise le système de réglage connu sous le nom de *série-parallèle*, dans lequel les moteurs peuvent, à l'aide du contrôleur, être mis en tension ou en dérivation l'un par rapport à l'autre.

Ce dispositif appliqué dans le dernier modèle des voitures Thomson-Houston, où l'on a supprimé les contacts mobiles sous la caisse du véhicule, permet de réduire l'importance du rhéostat grâce aux combinaisons diverses faites avec les inducteurs et les

induits. Pour affaiblir la puissance motrice, il est, en outre, possible de shunter les bobines inductrices des moteurs.

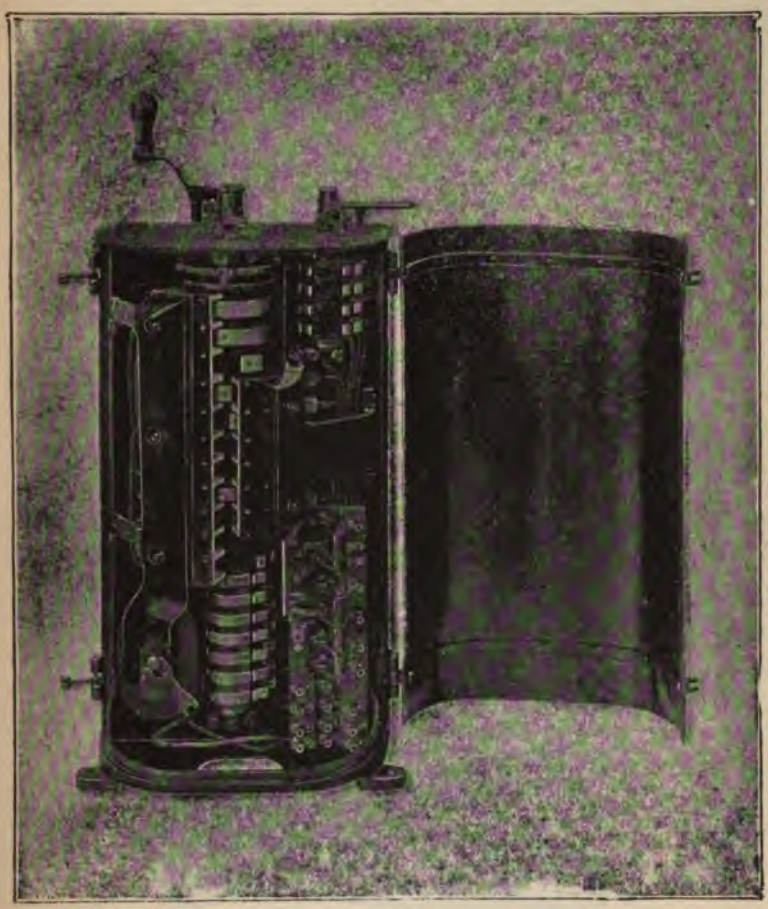

Fig. 26.

Le groupement en série des moteurs au démarrage a l'avantage de diminuer de moitié la différence de potentiel agissant sur chacune des machines, qui peuvent ainsi tourner à vitesse réduite, et d'affaiblir le courant à la mise en marche.

Il faut remarquer que, lorsque les deux moteurs sont reliés en parallèle, ils prennent parfois des courants inégaux et des vitesses

différentes, ce qui fait patiner l'une des paires de roues; ce régime est toutefois de faible durée, car la machine qui tourne trop vite produit une force contre-électromotrice plus grande tendant à ramener le courant à la valeur normale.

Le contrôleur Thomson-Houston, fig. 26, comporte un cylindre vertical portant des blocs de cuivre isolés à l'amiante comprimé et tournant devant des frotteurs en cuivre. Les étincelles de rupture sont brisées par un souffleur magnétique pourvu d'une pièce polaire

Fig. 27.

s'étendant au dessus des divers contacts. La poignée de droite sert à renverser le sens du courant dans l'induit, celle de gauche à fermer le circuit et à effectuer les diverses combinaisons nécessaires pour le réglage de la vitesse.

On peut éviter le soufflage magnétique en rompant le circuit simultanément en plusieurs points, de manière à réduire les étincelles. Pour empêcher des arcs de s'établir entre les blocs voisins, ceux-ci sont séparés par des cloisons isolantes et incombustibles.

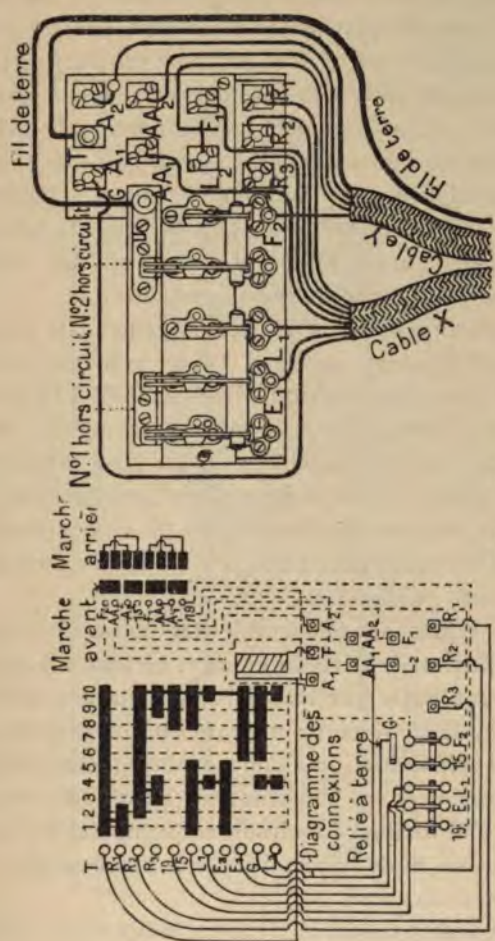

Fig. 28 et 29.

La fig. 27 montre un contrôleur plus simple, pour voiture à un moteur, de la Société d'Oerlikon.

Les fig. 28 et 29, tirées comme quelques unes des suivantes de l'*Électricien*, indiquent les connexions du contrôleur Thomson-

Houston pour deux moteurs. Sans entrer dans les détails, nous dirons que les principales combinaisons effectuées par cet appareil sont les suivantes : 1° un rhéostat de 6,1 ohms est mis en circuit avec les deux moteurs en série ; 2° 1,1 ohm, pris dans le rhéostat, reste dans le circuit des deux moteurs en série; 3° les deux moteurs sont en série sans résistance ; 4° on shunte par des résistances de 1,2 ohm les bobines inductrices des deux moteurs en tension ; 5° le rhéostat est mis en série avec les deux moteurs en parallèle; 6° les deux moteurs restant en parallèle, on supprime le rhéostat ; 7° on shunte les bobines inductrices des moteurs en parallèle [1].

L'inverseur adjoint, dans le système Thomson-Houston, au contrôleur, pour le renversement du courant dans l'induit et la marche en arrière, ne peut, grâce à un verrouillage spécial, être manœuvré que lorsque le contrôleur a ouvert le circuit.

Il existe des équipements où le changement de sens du courant et le réglage de la vitesse se font à l'aide du même levier. Lorsque la manette a dépassé la position correspondant à l'arrêt, elle établit quelques combinaisons pour la marche en arrière, naturellement en nombre plus limité que celles utilisées pour la marche en avant. Quelquefois enfin, le mécanicien ne peut, en renversant la manette, que mettre les moteurs en court-circuit ou en communication avec le frein électromagnétique. Dans ce cas, il doit changer de plate-forme pour faire reculer la voiture.

La fig. 30 représente l'ensemble des connexions de la voiture Thomson-Houston à prise de courant aérienne. Le courant arrivant de la ligne passe par les deux commutateurs situés sur les plates-formes ; de là, il gagne un parafoudre couvert par un solénoïde dont la self-induction s'oppose à l'écoulement des décharges atmosphériques vers les moteurs ; au parafoudre est adjoint un interrupteur à fil fusible. Le circuit est complété par le contrôleur, les moteurs et un fil de terre relié par la carcasse des moteurs à la masse du truc et aux rails.

Un circuit indépendant alimente 5 lampes en série, destinées

---

(1) De Bast, *Bull. de l'Ass. des Ing. sortis de l'Inst. Montefiore;* Mai-juin, 1896.

à l'éclairage de la voiture ; il y a, en outre, des lampes de sûreté à l'huile qui servent en cas d'interruption du courant.

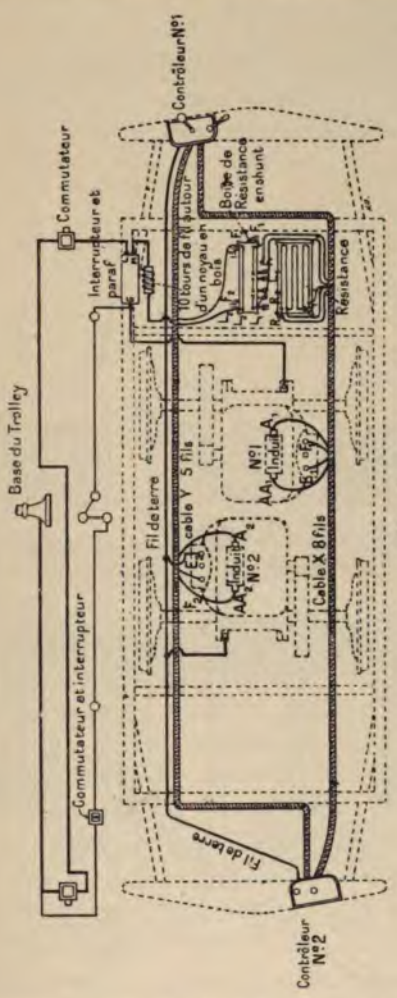

Fig. 30.

La fig. 31 montre d'une manière complète les connexions des moteurs B B′ et des contrôleurs D D′. Les résistances C C′ appartiennent au rhéostat de réglage.

Les résistances F servent au *chauffage électrique* de la voiture. Ce système de chauffage, employé sur quelques lignes, comporte

des radiateurs placés sous le plancher de la voiture et dans lesquels le courant transforme en chaleur une puissance d'environ 2,5 kilo

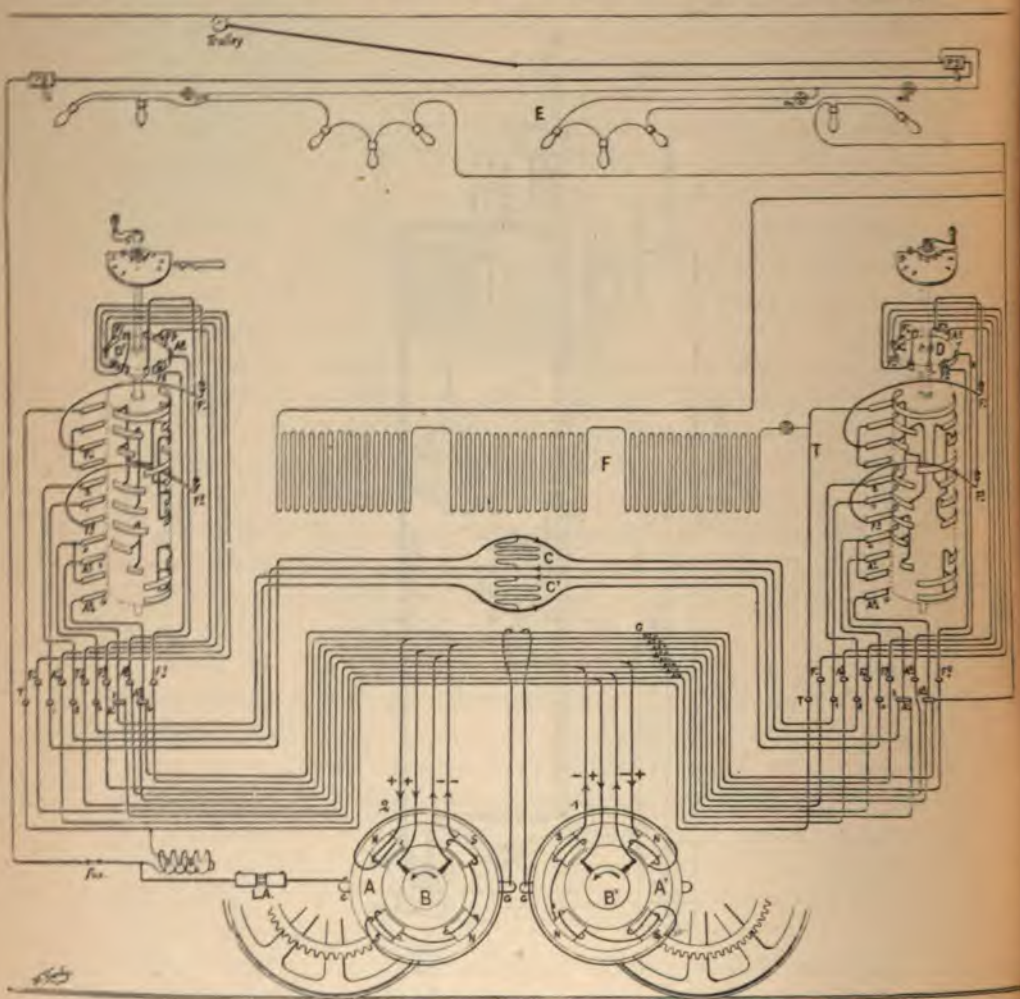

Fig. 31.

watts. Ce courant, qui est pris en dérivation par rapport au circuit des moteurs et des lampes, ne doit pas être permanent. On le fait passer à des intervalles de temps d'autant plus rapprochés que la

voiture contient moins de voyageurs et que la température ambiante est plus basse. Sur certaines lignes, on envoie le courant de démarrage dans ces résistances.

Les positions de la manivelle du contrôleur sont indiquées par des repères sur un cadran. Il faut habituer les conducteurs à utiliser de préférence les combinaisons dans lesquelles le rhéostat de démarrage est hors circuit, pour ne pas dissiper inutilement de l'énergie

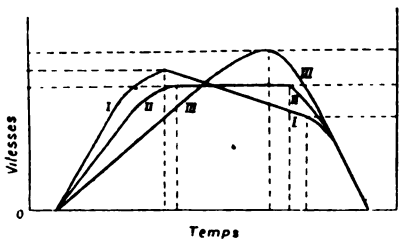

Fig. 32.

électrique. Il faut, en outre, passer lentement d'une combinaison à la suivante. Une manœuvre initiale trop brusque provoque un courant excessif et, par suite, une grande dépense d'énergie sans profit pour la rapidité du démarrage.

La période d'accélération de la voiture demande une attention particulière si l'on veut réduire l'énergie dépensée. Il y a une valeur maxima du courant dans les moteurs, dépendant de la puissance de ceux-ci et de l'adhérence, qu'il faut chercher à maintenir pendant la série des combinaisons effectuées à l'aide du contrôleur, car l'expérience a montré que, sur les lignes à arrêts fréquents, l'énergie requise est d'autant moindre que l'accélération est plus rapide. La supériorité des voitures électriques réside dans la possibilité de démarrages accélérés, grâce à la puissance des moteurs et à la grande adhérence.

Les arrêts multipliés nécessitent un emploi raisonné des freins. Les courbes de la fig. 32, qui représentent la vitesse d'un véhicule en fonction du temps et dont les aires figurent le chemin parcouru entre deux arrêts réglementaires, montrent trois manières différentes de conduire les voitures. Dans le premier cas, on donne rapidement une forte accélération, puis on interrompt le courant

et on laisse le véhicule se déplacer par sa force vive; enfin, on fait agir le frein pour atteindre l'arrêt sans vitesse. Dans le deuxième exemple, la vitesse n'est pas poussée jusqu'à une valeur aussi élevée que dans le cas précédent, mais elle est maintenue grâce à un courant réduit; après quoi on serre le frein. Enfin, dans le dernier cas, l'accélération est prolongée jusqu'au moment de l'action du frein. L'énergie totale dépensée est égale à la perte en frottements dans le véhicule et dans les freins. La perte en frottements occasionnée par la voiture reste sensiblement constante dans tous les cas; celle des freins est d'autant plus faible que l'action de ces derniers est plus restreinte. Comme l'énergie absorbée par le frein dépend de la force vive, c'est à dire du carré de la vitesse atteinte par le véhicule, on voit que le dernier procédé est le moins avantageux. Le premier est le meilleur, mais il exige des moteurs puissants et des arrêts rapprochés; le deuxième système est souvent employé lorsque les arrêts sont éloignés.

D'une manière générale, il y a tout avantage à ne confier la conduite des voitures qu'à des hommes soigneux et intelligents possédant quelques notions théoriques et pratiques sur l'électricité. On leur recommande de gravir les rampes à vitesse réduite, d'éviter les arrêts en courbe à cause de la difficulté du démarrage, de modérer l'intensité du courant avant de s'engager dans une courbe brusque afin de ne pas dérailler et de ne marcher en arrière qu'en cas de force majeure. Si les intervalles entre les arrêts sont courts, un conducteur exercé amène graduellement sa voiture en vitesse, puis coupe le courant lorsqu'il juge que la force vive du véhicule est suffisante pour atteindre le prochain stationnement avec une action des freins aussi restreinte que possible.

Chapitre II.

SYSTÈMES DE TRACTION DES TRAMWAYS.

Prises de courant aériennes. Trolley, frotteur, archet et rouleau. Systèmes Van Depoele, Dickinson, Short, Siemens et Walker. — Des méthodes variées sont en usage pour conduire le courant des générateurs fixes aux électromoteurs placés sur une voiture de tramway. Le courant peut être amené par des conducteurs suspendus au dessus de la voie, placés au niveau de celle-ci ou enfouis dans un caniveau souterrain. Les électromoteurs se raccordent aux conducteurs par des contacts entraînés dans le mouvement du véhicule. Ordinairement, les rails servent de conducteurs de retour, la liaison entre les rails et les moteurs ayant lieu par l'intermédiaire des essieux et des roues du véhicule.

Un Belge établi aux États-Unis, M. Van Depoele, a imaginé le système de prise de courant le plus employé. Le conducteur qui amène l'énergie électrique est un fil de bronze ou de cuivre étiré de 8 à 9 mm de diamètre, suspendu par des isolateurs dans l'axe de la ligne de tramway, à 7 ou 8 m au dessus du sol. Un galet mobile ou *trolley*, porté par une longue tige articulée au sommet de la voiture, roule à la partie inférieure de ce conducteur, appelé fil de trolley.

La fig. 23 donne une vue d'ensemble de ce système de prise de courant.

Les fig. 33 et 34 montrent les détails du trolley et les fig. 35 et 36 deux modes de fixation de la tige du trolley sur la toiture du véhicule.

Fig. 33.

Fig. 34.

La roulette est une poulie à gorge en bronze ; elle tourne sur un axe métallique entouré d'un tube de graphite qui sert de lubrifiant. Pour améliorer le contact électrique du trolley avec son axe, l'on ajoute souvent des frotteurs en charbon fixés à la fourchette qui embrasse le trolley et appuyant sur ce dernier.

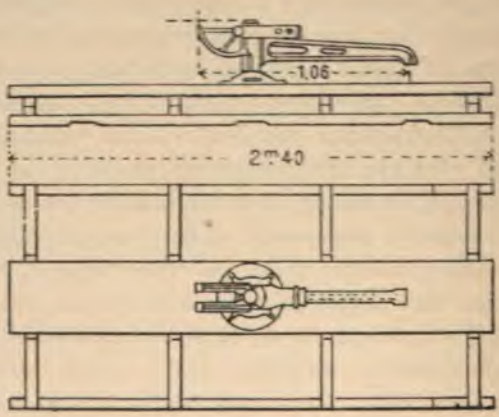

Fig. 35.

Le galet est porté par un tube d'acier articulé sur un châssis en bois boulonné au toit de la voiture. La tige peut pivoter autour d'un axe horizontal et d'un axe vertical pour suivre les coudes

du fil de prise de courant et pour permettre le retournement, lorsque la voiture est arrivée à la limite de sa course. Des ressorts tendent à relever la tige du trolley et à exercer sur le fil un effort

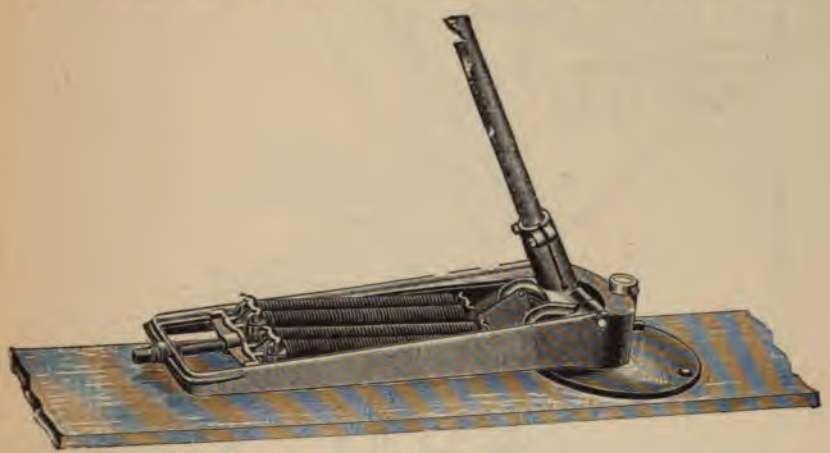

Fig. 36.

qu'on règle aux environs de 4 kg. Lorsque, dans les coudes, le fil de trolley fait un angle trop accusé avec l'axe de la voie, les joues de la roulette coïncent le fil et un déraillement peut s'ensuivre, fig. 37.

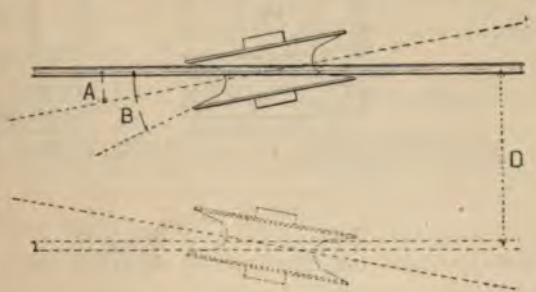

Fig. 37.

Pour obtenir plus de latitude et pouvoir donner au fil de trolley un contour polygonal à angles moins obtus et à côtés plus allongés, M. Dickinson a imaginé de rendre le plan de la roulette mobile, avec la fourche, autour d'un axe vertical, fig. 38. La

ligne aérienne peut alors être reportée sur le côté de la voie ; elle est soutenue par de courtes potences attachées à des poteaux plantés sur les trottoirs ou les accotements.

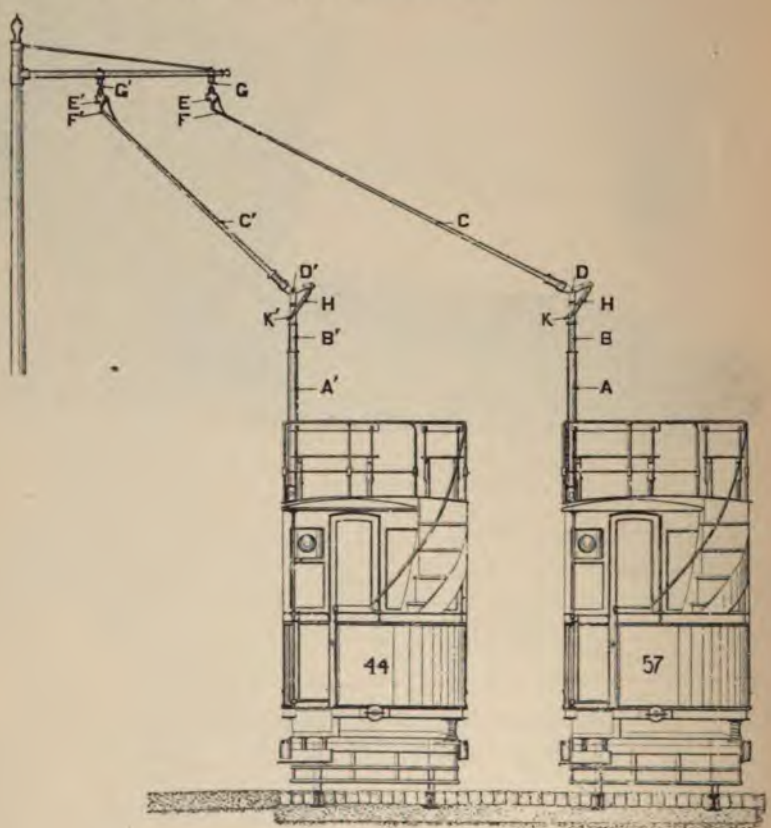

Fig 38.

Les voitures portent un mât vertical A assez élevé pour permettre l'emploi de voitures à impériale et dans lequel pénètre un pivot portant la perche C articulée en D et relevée par un ressort H. L'extrémité F de la tige soutient une crapaudine, dans laquelle tourne le trolley G.

La fig. 39 montre un système de prise de courant imaginé par M. Short et dans lequel le galet roulant est remplacé par une sorte de selle glissant sous le fil qui amène le courant. La partie concave

de la selle est garnie d'un alliage mou destiné à restreindre l'usure du fil.

Fig. 39.

Le tube d'acier qui porte ce frotteur est relevé par deux ressorts montés sur un support à axe vertical, ce qui permet au frotteur un déplacement latéral de 1 m, en même temps qu'un déplacement de 7 m suivant la verticale.

La Maison Siemens emploie un système de prise de courant, dit à *archet*, compatible avec les coudes brusques de la ligne aérienne placée au dessus de la voie, fig. 40. Une charpente métallique légère, articulée sur le toit du véhicule et pivotant autour d'un axe horizontal, est sollicitée à se redresser par des ressorts; elle porte à la partie supérieure une traverse ou archet glissant sous le fil de prise de courant. Afin de diminuer l'usure de ce dernier, on garnit le dessus de l'archet d'un manchon en aluminium présentant des rainures longitudinales remplies de graisse. En donnant à la traverse une longueur de 1,50 m, le fil aérien peut dévier de 0,75 m par rapport à l'axe de la voie, de sorte qu'il est possible de tendre ce fil suivant des polygones à longs côtés, de réduire le nombre de supports et de haubans et de faciliter les aiguillages et les croisements. Pour que l'archet ne s'use pas toujours au même point, le fil aérien est intentionnellement tendu suivant des zigzags allongés.

Le système Walker est une combinaison du trolley et de l'archet.

La tige articulée sur le sommet de la voiture porte un rouleau horizontal pivotant sur billes, fig. 41, et permettant, comme l'archet, un certain déplacement latéral du fil aérien.

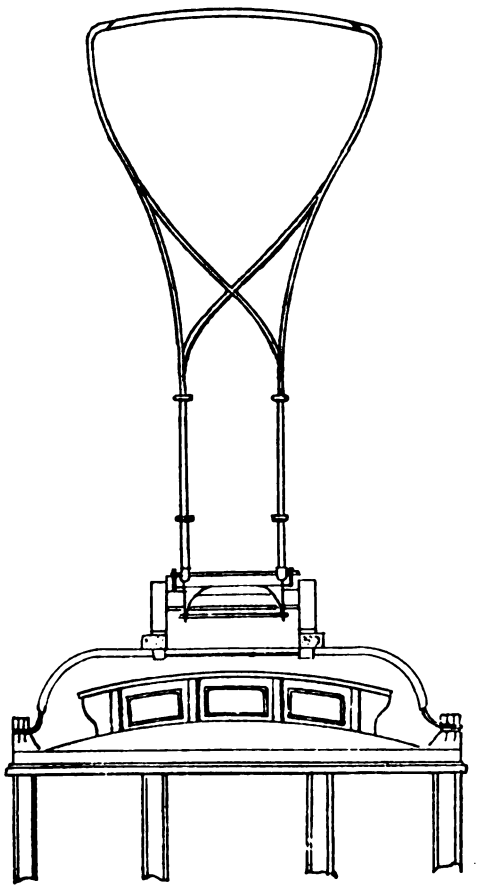

Fig. 40.

Matériel des lignes aériennes de prise de courant. — Nous nous occuperons particulièrement des lignes à trolley, qui sont les plus répandues.

Les dynamos génératrices doivent maintenir une tension aussi constante que possible sur les conducteurs de prise de courant. Dans ce but, on les munit d'une excitation hypercompound.

Si la ligne est courte et de faible trafic et si la chute de tension

maxima dans le fil de trolley ne dépasse pas 10 pour 100, on se contente de relier ce dernier en un point à la station, qu'on dispose, autant que possible, vers le milieu de la ligne.

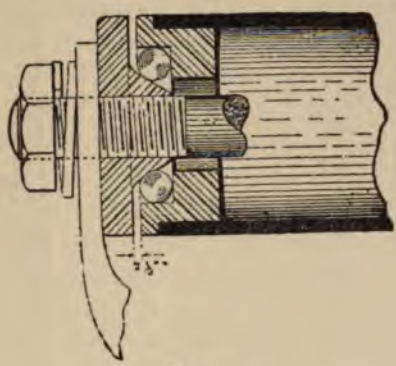

Fig. 41.

Lorsque la ligne est longue, l'on régularise la différence de potentiel entre le conducteur de prise de courant et les rails par des feeders dans lesquels la chute de tension est uniforme. Ces feeders raccordent les générateurs à des points convenablement choisis de la ligne. Afin d'éviter qu'un court-circuit dans l'une des voitures circulant sur la voie n'amène un arrêt général du service, l'on fractionne le conducteur de prise de courant en tronçons de 400 à 500 m, raccordés à des feeders protégés, à la station, par des interrupteurs automatiques. On peut relier les divers tronçons entr'eux pour diminuer la chute de tension, à la condition d'interposer des fils fusibles qui isolent un tronçon en court-circuit. Souvent, chacun des feeders partant de l'usine aboutit entre deux sections du conducteur de prise de courant. En raccordant ces feeders avec les tronçons voisins par des sûretés, on réalise la condition précédente. Il est bon, lorsque des feeders se croisent dans un réseau de tramways, de les réunir par des fils fusibles de manière qu'ils viennent en aide les uns aux autres et que la perte de charge soit diminuée.

Une disposition moins recommandable consiste à remplacer les feeders par un distributeur à section décroissante partant de l'usine et connecté au fil de trolley aux endroits des raccords des tronçons

de ce dernier. En cas d'accident au distributeur, tout le service est interrompu.

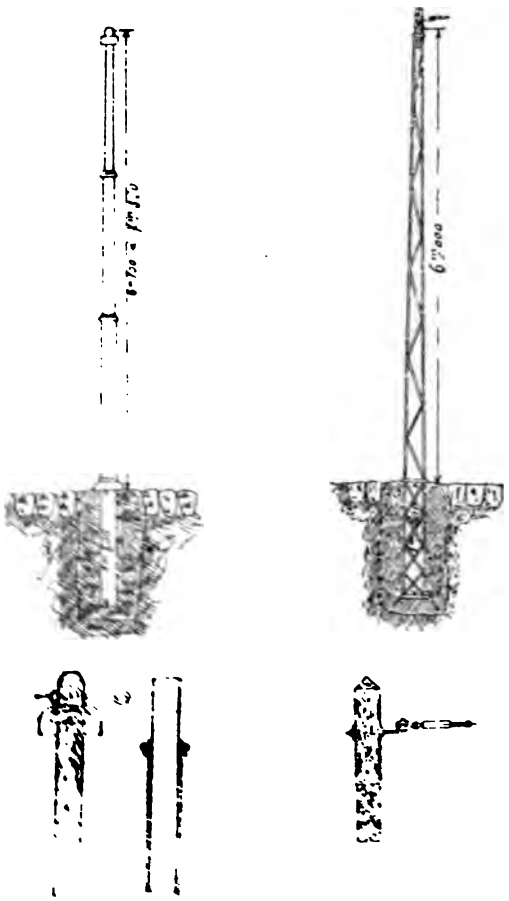

Fig. 42. Fig. 43.

Dans les grands réseaux de tramways, on combine des feeders partant de l'usine avec des distributeurs courant le long des voies et destinés à soulager le fil de service qu'ils alimentent de distance en distance.

D'une manière générale, les connexions des feeders ou des distributeurs souterrains avec le fil de prise de courant se font, dans

des boîtes en fonte, par l'intermédiaire d'interrupteurs, de sûretés fusibles et de parafoudres. Les agents de police ont une clef de ces boîtes, afin de couper le courant en cas d'accident.

Les fils de prise de courant sont fournis par sections d'une seule pièce, qui atteignent jusque 1 600 m de longueur, afin de réduire le nombre des jonctions. Ils sont tendus, à 7 m environ au dessus du sol, entre des appuis écartés de 35 à 40 m en alignement droit, de manière que les flèches ne dépassent pas 40 cm. Les fils aériens sont supportés par des isolateurs maintenus eux mêmes par le haut, de manière à permettre le passage du trolley. Ces isolateurs peuvent être soutenus de diverses manières.

Dans les rues, on les attache de préférence à des fils transversaux en acier, de 5 à 6 mm de diamètre, fixés à des consoles ou rosaces ancrées dans les murs des habitations riveraines. Si les rues sont trop larges ou si le placement des consoles n'est pas autorisé, l'on suspend les fils transversaux entre deux poteaux plantés sur les trottoirs.

Le long des quais et des boulevards, on utilise des poteaux pourvus d'une potence sous laquelle est tendu un fil soutenant l'isolateur du fil de trolley ; de cette manière, l'on ménage à la ligne une élasticité suffisante pour empêcher le choc que le trolley éprouverait contre un support rigide. Dans le cas d'une ligne à double voie, l'on peut employer des poteaux à deux potences plantés dans l'entrevoie. Ces poteaux reçoivent parfois les lampes électriques destinées à l'éclairage public.

Les poteaux sont le plus souvent formés de tubes d'acier emboîtés les uns dans les autres, fig. 42. Les poteaux en treillis, fig. 43, sont moins coûteux, mais ils s'oxydent plus facilement et sont moins décoratifs. Ces supports sont encastrés dans un lit de béton et s'élèvent à 7 m ou 7,50 m au dessus du sol ; ils doivent résister à une traction latérale de 250 kg.

Afin d'assurer un bon isolement aux fils aériens, on tend les fils transversaux entre les poteaux ou les consoles à l'aide de tendeurs à isolateurs, dont la résistance s'ajoute à celle des isolateurs de ligne. La fig. 44 représente un isolateur de tension portant à gauche un œillet pour la fixation au collier du poteau ou à la console. Le fil transversal est fixé à l'œillet de droite, lequel

termine une vis qu'on serre en tournant l'écrou qui joue dans la masse de bronze de l'appareil. L'isolement est obtenu au moyen de la composition connue sous le nom d'*aetna*. Si l'on emploie

Fig. 44

des tendeurs non isolés, on peut interposer dans l'attache au poteau un isolateur à boule, fig. 45.

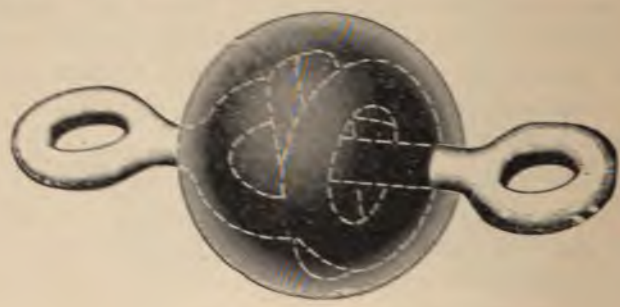

Fig. 45.

Pour soutenir le fil de trolley, le fil transversal peut être passé autour du casque en bronze surmontant l'isolateur de ligne, fig. 46,

Fig. 46.

Fig. 47.

Fig. 48.

ou fixé à des oreilles, fig. 47. Dans le cas où un hauban soutient le fil de trolley d'un seul côté, comme dans les courbes, un isolateur à oreille unique suffit, fig. 48.

Dans ces divers isolateurs, la matière isolante porte une pièce de bronze en T, dont la branche horizontale présente à la partie inférieure une rainure dans laquelle le fil est serré et soudé.

Pour réunir deux bouts de fil de trolley, la branche horizontale est percée de deux orifices verticaux, dans lesquels on replie le fil en crochet, afin de lui permettre de résister à une traction énergique, fig. 49.

Fig. 49.

Si l'on veut séparer les tronçons contigus du fil de trolley et former des sections isolées, on utilise une jonction, telle que celle de la fig. 50, dans laquelle les parties métalliques guidant le trolley sont séparées par une réglette isolante.

Fig. 50.

Pour retenir les deux tronçons du fil de service, avant de les fixer aux jonctions précédentes, on emploie un tendeur provisoire, qui peut recevoir la forme de la fig. 51.

Fig. 51.

Les bifurcations, telles que celles qui précèdent les voies de garage, sont réalisées en réunissant les trois bouts de fil de

Fig. 52.

trolley à une pièce en bronze maintenue par des fils transversaux et présentant des nervures qui guident le trolley, fig. 52. Les

croisements de lignes sont pourvus d'appareils analogues en forme de croix.

Ces bifurcations constituent toujours un danger de déraillement pour le trolley ; aussi, dans beaucoup de lignes à voie unique emploie-t-on actuellement 2 fils de trolley sur tout le parcours, ces conducteurs étant séparés d'une vingtaine de cm au dessus de la voie unique et écartés suivant les axes des voies dans les garages.

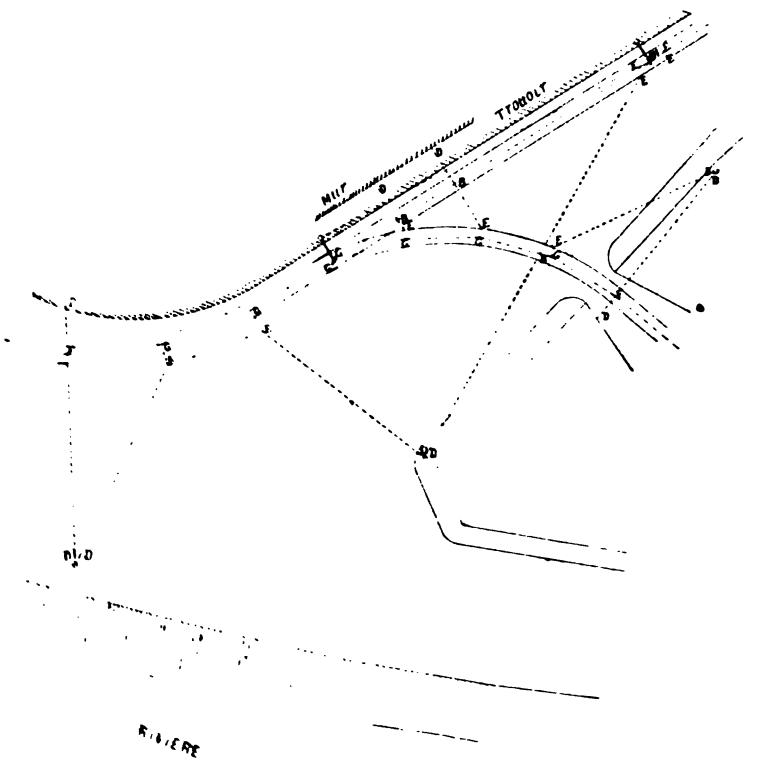

Fig. 53.

Dans les courbes, on est obligé de maintenir le fil de trolley, par des haubans en fil d'acier fixés à des poteaux ou des consoles, de manière qu'il décrive un polygone épousant autant que possible les sinuosités de la voie. La fig. 53 montre un cas compliqué d'alignements et de courbes. Le système Dickinson et, mieux encore, le

système de prise de courant par archet suppriment en grande partie les réseaux qu'on est forcé de tendre au voisinage des coudes des lignes.

Les prises de courant par archet et par rouleau permettent aussi de simplifier les pièces de bifurcation et de croisement. La fig. 54 montre une bifurcation du système Walker.

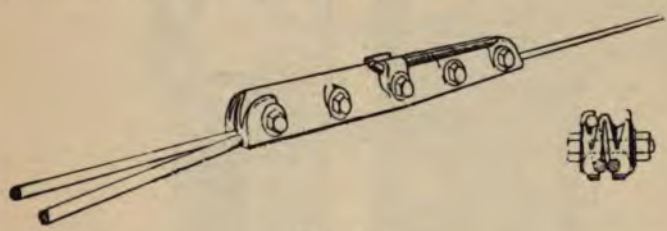

Fig. 54.

Dans les alignements, il est nécessaire de maintenir le fil de trolley, à distances de quelques centaines de mètres, par des haubans tendus en croix de St-André, pour empêcher le conducteur aérien de se déplacer suivant l'axe de la voie.

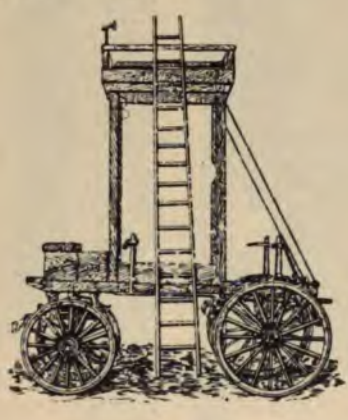

Fig. 55.

Le montage des lignes est facilité par des chariots à plate-forme venant à la hauteur des fils aériens, fig. 55.

Tramways à caniveau souterrain. Systèmes Bentley Knight, Siemens, Thomson-Houston. — L'emploi des conduc-

teurs aériens a rencontré, dans quelques grandes villes, une opposition motivée par le souci de l'esthétique des rues et la préoccupation d'éviter les accidents qui sont susceptibles de se produire

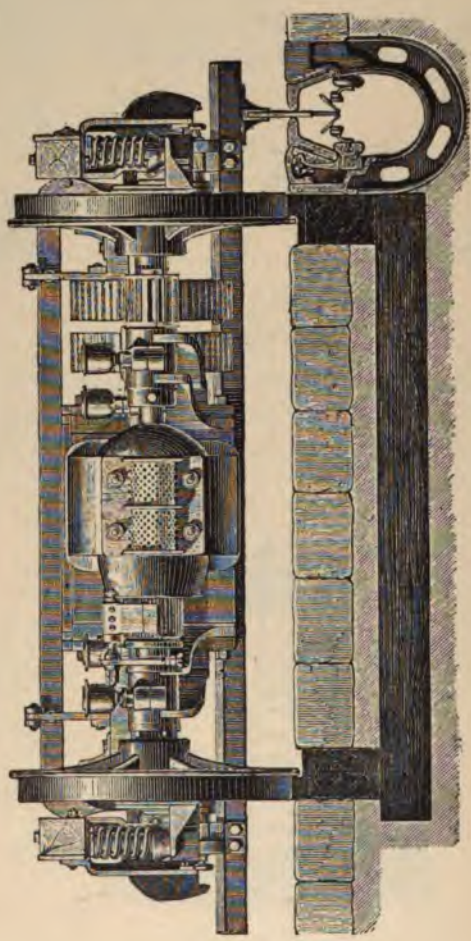

Fig. 56.

par la chute de conducteurs maintenus à des potentiels élevés. Eu égard à l'économie réalisée par le système aérien et aux sérieuses améliorations de service qu'il procure, la plupart des villes autorisent cependant ce système.

Pour éviter les fils aériens, on a tenté des combinaisons permettant l'emploi de conducteurs posés, sur isolateurs, dans des galeries situées sous la voirie. Pour raccorder les électromoteurs au circuit fixe, l'on fait usage de frotteurs pénétrant dans le caniveau par une fente étroite ménagée à la partie supérieure. Malheureusement, l'eau et la boue qui affluent par cette ouverture peuvent compromettre l'isolement de la ligne, particulièrement dans les pays où les pluies et les neiges sont fréquentes. On arrive cependant à réduire cet inconvénient, dans les villes où existe un bon réseau d'égouts, en écartant les conducteurs de l'axe de la rainure et en ménageant dans le caniveau une pente vers des drains débouchant dans les galeries d'égout. Un personnel spécial doit être affecté au curage du caniveau.

Des installations de ce genre fonctionnent d'une manière satisfaisante ; toutefois la pose et l'entretien d'une canalisation souterraine sont naturellement beaucoup plus difficiles et plus coûteux que ceux d'une ligne aérienne, étant donné que le caniveau doit être protégé contre les efforts d'écrasement par une infrastructure de la voirie d'une solidité exceptionnelle. Il faut, autant que possible, prévoir des dispositions propres à permettre de démonter les conducteurs souterrains sans ouvrir la chaussée, ce qui était nécessaire dans le premier système essayé par M. Bentley Knight, à Alleghany City, fig. 56.

Dans ce système, le caniveau souterrain est placé sur le bord extérieur de la voie. Il est en béton revêtu intérieurement de ciment. A des intervalles de 1,20 m, des cadres de fonte en forme de U sont enfouis dans le béton. A ces pièces sont boulonnées des longrines fermant la conduite en laissant entr'elles un intervalle suffisant pour le passage de l'appareil de contact. A ces mêmes cadres sont fixés latéralement des isolateurs en porcelaine portant, sur des agrafes métalliques, les deux conducteurs parallèles qui amènent le courant à la voiture par l'intermédiaire de deux frotteurs élastiques. Ceux-ci, en relation par des bandes conductrices avec l'électromoteur, sont attachés à une pièce mobile dans une glissière parallèle à la voie. Ainsi qu'on le voit, les rails ne jouent aucun rôle au point de vue électrique.

La fig. 57 représente une coupe faite à travers la première voie

souterraine établie, par MM. Siemens et Halske, à Budapest [1]. Les conducteurs sont logés dans une conduite en béton située sous l'un des rails et dont la section ovoïde comporte une hauteur de 33 cm sur une largeur de 28 cm. De 1,20 m en 1,20 m, des cadres en fonte, ayant le profil du canal, soutiennent celui-ci en même temps qu'ils servent de gabarits pendant la construction. Ils portent des

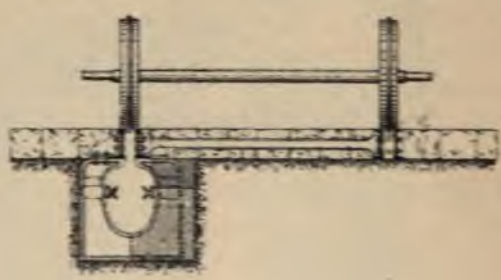

Fig. 57.

isolateurs auxquels sont attachés des conducteurs en forme de cornières. Les rails, du système Haarmann, sont boulonnés aux cadres et ont une section suffisante pour résister aux charges les plus lourdes circulant sur le sol. Ils laissent entr'eux un intervalle de 33 mm par lequel passe l'appareil de prise de courant. Des orifices d'évacuation vers les égouts sont ménagés pour l'eau qui entre dans la conduite.

Dans une nouvelle voie souterraine étudiée par MM. Siemens et Halske, diverses améliorations ont été apportées. Les supports en fonte sont écartés de 1,25 m et les isolateurs de 2,50 m. Ceux-ci ne sont plus fixés latéralement, ce qui permettait à la boue de couvrir leurs supports, mais soutenus par des tiges en fer verticales, fixées aux rails. Au niveau de la chaussée, aux endroits des isolateurs, se trouvent des trapillons. En ouvrant ceux-ci, l'on peut

---

[1] *Wochenschrift des Osterr.-Ingenieur und Architekten Vereines*; 2 janvier 1891.

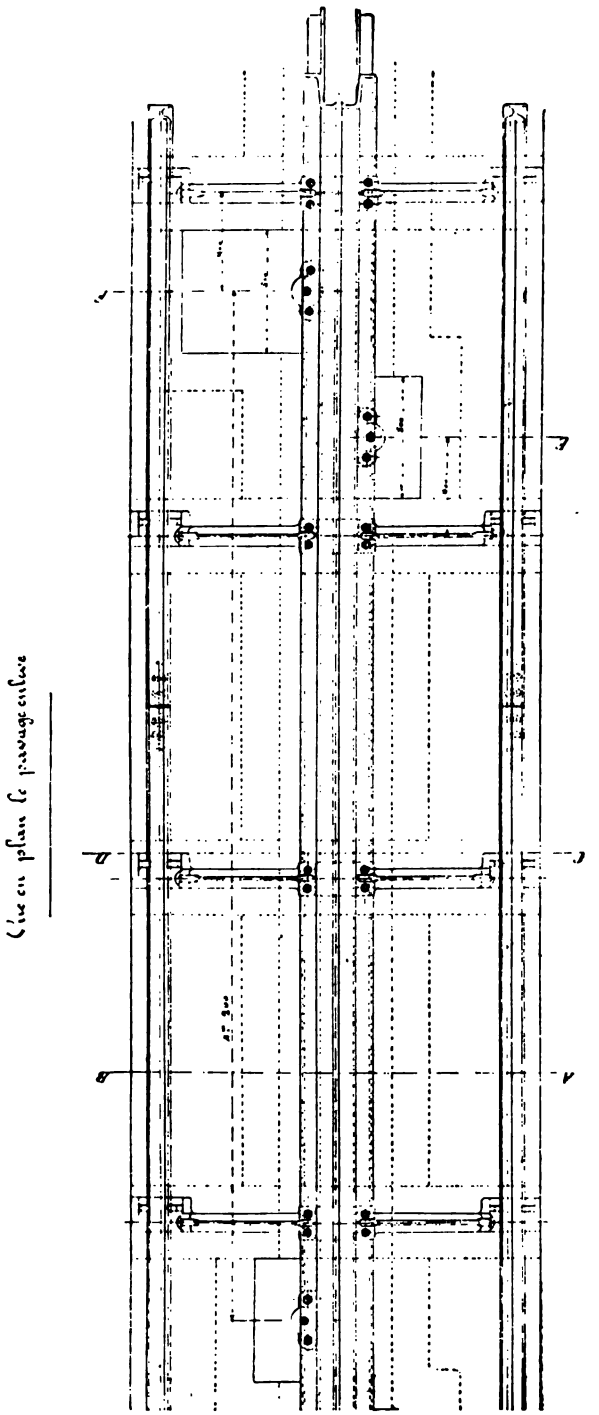

Fig. 58.

démonter les conducteurs, qui ont une forme en T, et les sortir par la rainure, sans enlever les rails comme dans le premier système.

La Société l'Union, de Berlin, a employé un caniveau analogue, dans lequel les conducteurs, en forme de petits rails, sont supportés tous les 8 m seulement par des isolateurs logés dans des boîtes métalliques, auxquelles on a accès par des couvercles à démonter. Pour changer un conducteur, on dévisse ses isolateurs et on le porte, par des cordes passant dans la rainure, jusqu'à un endroit où la voie se démonte facilement. Ces orifices de sortie se rencontrent tous les 133 mètres.

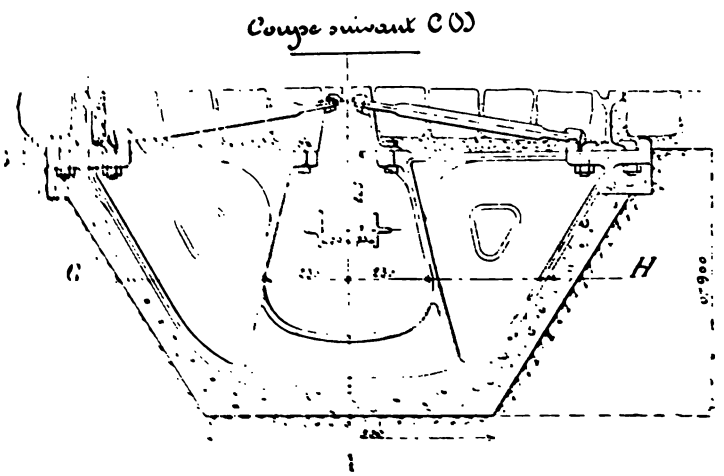

Fig. 50.

Les fig. 48, 50 et 60 montrent une vue en plan et deux coupes de la voie souterraine adoptée par la Compagnie française pour l'exploitation des brevets Thomson-Houston. Les cadres en fonte ménageant un caniveau axial servent en même temps de traverses pour les rails de roulement. Les conducteurs d'amenée du courant sont des barres rigides de section en T, supportées par des isolateurs [illegible] l'appareil de prise de cou- [illegible] sabots appuyés latérale- [illegible] ressorts horizontaux semi-

elliptiques. Il nécessite des trappes pour être retiré du caniveau, mais il permet de réduire à 20 mm la largeur de la rainure de celui-ci.

Dans tous ces systèmes, il y a un conducteur d'aller et un conducteur de retour, pour éviter le retour par les rails qui occasionne des détériorations dont il sera question plus loin.

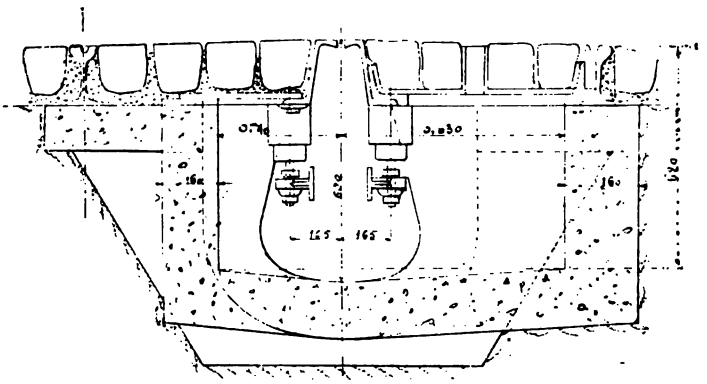

Fig. 60.

On a proposé, à Paris, de recourir à des galeries de section suffisante pour être visitées par un homme qui serait couché sur un chariot roulant dans ce petit tunnel. Ainsi, l'on éviterait les difficultés d'entretien et de curage auxquelles donnent lieu les petits caniveaux. Mais ce système serait extrêmement coûteux, particulièrement dans les villes où le sous-sol est encombré par des canalisations multiples qu'il faudrait détourner pour le passage de la galerie.

Amenée du courant par conducteurs interrompus. Systèmes Westinghouse, Diatto, Claret et Willeumier. — Pour éliminer les inconvénients des conducteurs de prise de courant aériens et souterrains, divers inventeurs ont imaginé de disposer au niveau de la voie, entre les rails, des conducteurs interrompus, tels que des blocs d'acier en forme de pavés, écartés de 2,50 m à 3 m et mis en communication avec la station électrique au mo-

ment où ils sont recouverts par la voiture automobile. Ce procédé exige des connecteurs automatiques nombreux qui rendent son fonctionnement plus délicat que celui des dispositions précédentes. Les dérivations qui proviennent du contact des blocs avec le sol

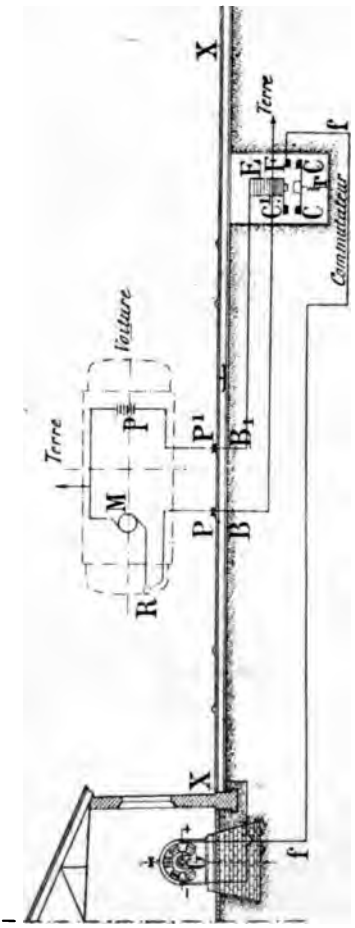

Fig. 61.

humide sont de peu d'importance, attendu que la surface de contact est minime.

Parmi les systèmes les mieux étudiés, nous citerons celui de M. Westinghouse, qui fonctionne à Washington.

Dans ce système, la voiture porte à la partie inférieure deux bandes de fer parallèles servant de frotteurs et venant en contact avec deux lignes de pavés métalliques disposés deux à deux dans l'entrevoie. Dans le schéma de la fig. 61, les deux pavés B, B_1 d'un groupe sont, pour la clarté des connexions, représentés l'un devant l'autre, au lieu d'être l'un à côté de l'autre.

Lorsque le frotteur P' touche un pavé B_1, une petite batterie d'accumulateurs, portée par la voiture et dont un pôle est à la terre,

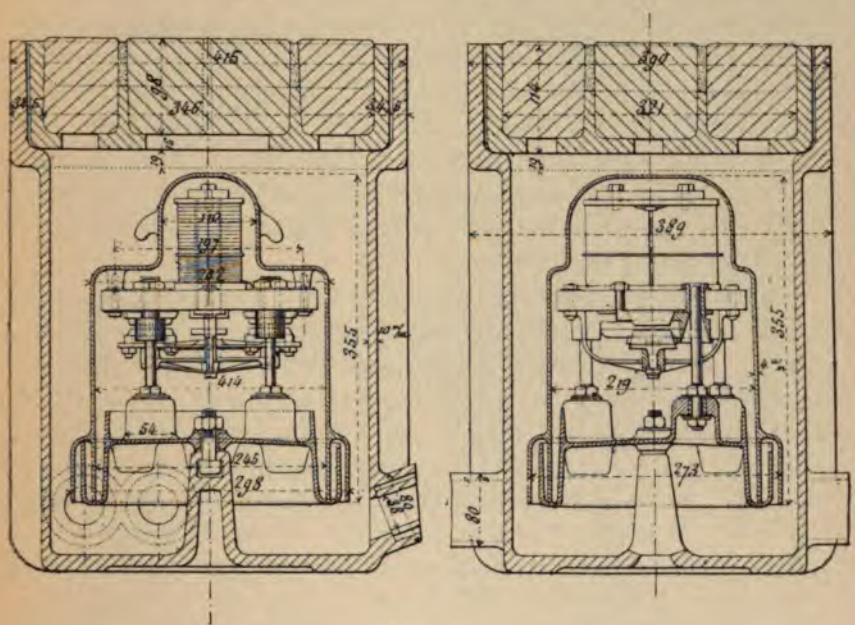

Fig. 62.

envoie un courant dans le circuit E d'un électro-aimant; le noyau de celui-ci attire une armature qui appuie deux contacts en charbon C, C contre deux buttoirs C', F de même nature. Le dernier de ces buttoirs est connecté d'une manière permanente au câble distributeur *f f* venant de l'usine, de sorte que le pavé B, en relation avec le moteur de la voiture, reçoit le courant par l'intermédiaire de l'armature CC et d'une seconde bobine enroulée sur l'électro-aimant dans le but d'accroître l'attraction de ce dernier. Le courant

retourne par les rails comme dans les tramways à fils aériens. Le frotteur P ne quitte un pavé qu'après être venu en contact avec le pavé suivant ; le pavé abandonné s'isole par la chute de l'armature CC sous l'action du ressort antagoniste *r*, et peut être touché sans danger. Les croisements et bifurcations ne donnent lieu à aucune difficulté spéciale ; dans les courbes, on emploie des pavés élargis.

Afin de parer aux chances d'interruption résultant de la multiplicité des connecteurs, M. Westinghouse a étudié les moyens de remplacer rapidement les électro-aimants défectueux. Le connecteur est dans une boite en fonte, fig. 62, fermée par un couvercle dans lequel on peut disposer des pavés en grès pour éviter le glissement des pieds des chevaux. A l'intérieur de la boite, une cloche en fonte recouvre l'électro-aimant ; lorsqu'on introduit un électro-aimant de rechange dans son logement, les connexions se rétablissent d'elles-mêmes.

M. Diatto utilise l'attraction magnétique d'un électro-aimant porté par la voiture, pour manœuvrer des connecteurs dont la fig. 63 montre les détails. Du câble de distribution K se détache une dérivation I dont l'extrémité supporte la coupe I′ contenant du mercure. Dans celui-ci plonge la tige LL′ qui traverse la garniture d'ébonite NN′ et affleure supérieurement dans une cavité remplie de mercure, où pend la goupille en fer D dont la tête en charbon est l'une des parties d'un interrupteur. La boite métallique rapportée OO′ enferme cet interrupteur dans un espace hermétiquement clos, à l'abri des infiltrations de gaz et d'humidité. La boite est vissée au couvercle C dont le noyau central seul est en fer, le restant étant constitué par de l'acier au nickel antimagnétique.

La cloche qui termine inférieurement la garniture d'ébonite NN′ et recouvre le godet I′ a pour but d'empêcher qu'en aucun cas de l'eau puisse s'élever jusqu'à ce dernier.

La voiture transporte au dessus de la ligne des pavés de contact C, espacés de 3 m environ, des électro-aimants A, dont les pôles conséquents médians sont munis d'une bande longitudinale en fer B constituant la pièce de contact glissante. Les pôles extérieurs GG et les pièces arquées F noyées dans le bloc d'asphalte M

servent à réduire la reluctance du circuit magnétique comprenant la goupille D.

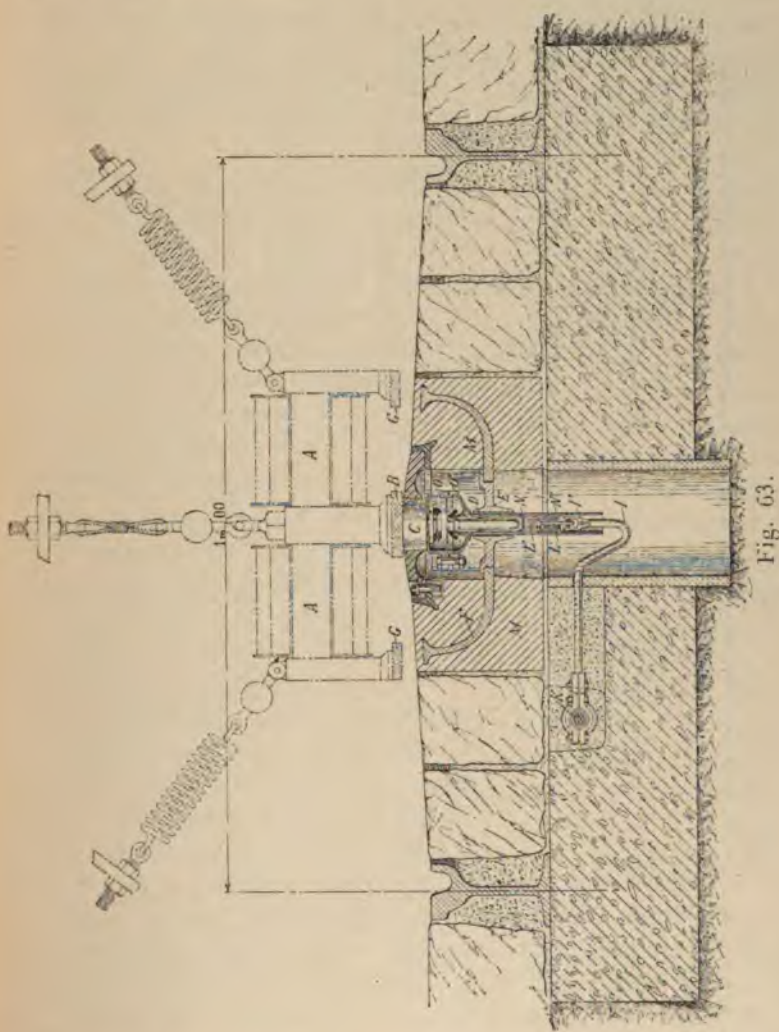

Fig. 63.

Celle-ci est suffisamment légère pour être aisément attirée par l'électro-aimant et retombe spontanément après le passage de la voiture. La tête en charbon qui la surmonte relie le noyau C élec-

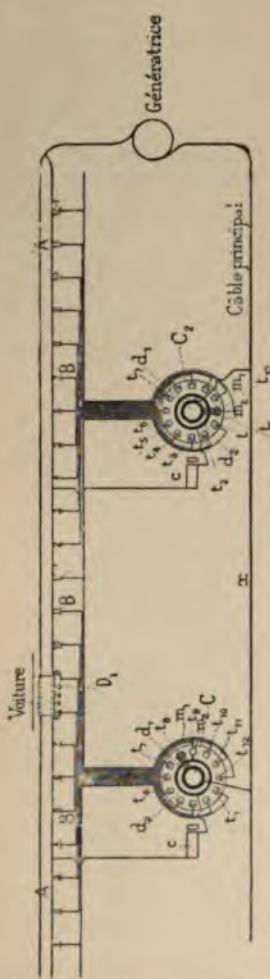

Fig. 64.

triquement au câble K en venant toucher la pièce correspondante attachée à la boîte OO'.

Il suffit de détacher les vis qui retiennent le couvercle C pour retirer l'ensemble du connecteur, dont le remplacement en cas de détérioration est très aisé.

Dans le système Claret et Willeumier, qui a fonctionné à titre d'essai à Lyon et qui, après avoir subi quelques modifications, est exploité sur la ligne de la place de la République à Romainville, à Paris, des pavés en fonte sont également distribués de 2,50 m en 2,50 m dans l'entrevoie et sont touchés par une bande de contact reliée aux moteurs, qui communiquent d'autre part avec les rails. Mais au lieu d'un connecteur par pavé, il n'y a qu'un distributeur de courant pour un groupe de 20 pavés de contact, fig. 64. Quand la bande portée par la voiture vient toucher un contact, un courant est envoyé dans un électro-aimant du distributeur et l'armature de cet électro-aimant déplace un commutateur circulaire qui établit une liaison directe entre le câble d'alimentation et les moteurs. Par le jeu de l'électro-aimant, le commutateur progresse en même temps que la voiture. On voit que deux voitures ne peuvent jamais circuler simultanément sur la section commandée par un distributeur; de plus, en cas d'arrêt d'un distributeur, une section entière est mise hors service. Quand il s'agit d'une ligne à voie unique, l'on emploie une disposition spéciale permettant aux commutateurs de fonctionner dans les deux sens. Les distributeurs sont placés sous les trottoirs et reliés par des connexions aux pavés de contact.

Effet des fils aériens sur les téléphones. — Dans la grande majorité des tramways électriques, on fait usage de conducteurs aériens. Dans ce cas, comme dans les systèmes à conducteurs interrompus, le retour a lieu par les rails. La tension généralement admise dans ces conducteurs est voisine de 500 volts. L'expérience semble avoir montré que cette tension n'offre pas de danger, car des milliers d'agents appartenant aux compagnies de tramways ont subi les secousses électriques qu'elle produit sans inconvénients graves.

L'emploi de conducteurs aériens avec retour par la terre occasionne des troubles dans les lignes téléphoniques à simple fil, qui se servent également du sol pour le retour du courant. Les effets observés sont de deux espèces : il se produit des phénomènes d'induction et de dérivation. Remarquons tout d'abord que le courant qui traverse le fil du tramway est variable par suite du déplacement même des véhicules, des variations du contact des trolleys avec le fil et des roues avec les rails, des démarrages et des arrêts. Si une ligne semblable est voisine d'une ligne téléphonique parallèle sur une certaine étendue, l'on entend, par induction, dans les téléphones des bruits accusant les variations du courant dans les électromoteurs. En second lieu, si la ligne téléphonique prend terre dans le voisinage des rails, une dérivation du courant traverse les téléphones. Le son qui en résulte peut devenir très intense au moment d'une variation brusque du courant ; les démarrages provoquent un sifflement particulier.

Ces inconvénients peuvent être évités par l'emploi d'un double conducteur aérien pour amener le courant aux voitures. Ce système apporte une grande complication dans les aiguillages et les croisements et il expose à des courts-circuits entre les deux fils voisins : aussi n'est-il employé que dans quelques localités américaines. La fig. 65 montre le double trolley utilisé dans ce cas.

Il semble que la solution soit plutôt dans l'emploi d'un double fil pour les communications téléphoniques, système qui est avantageux au point de vue de l'exploitation des téléphones, car il met ceux-ci à l'abri, non seulement de l'induction et des dérivations provenant des tramways, mais aussi de l'action des fils télégraphiques et des fils à lumière, en même temps qu'il empêche

les communications téléphoniques de se troubler mutuellement. C'est pourquoi le Congrès de Paris, en 1889, a vivement recommandé l'adoption du double fil dans les circuits téléphoniques. Aux Etats-Unis, on s'est bien trouvé également de l'emploi d'un seul fil de retour isolé, de gros diamètre, pour un faisceau de fils téléphoniques. La suppression du retour par la terre

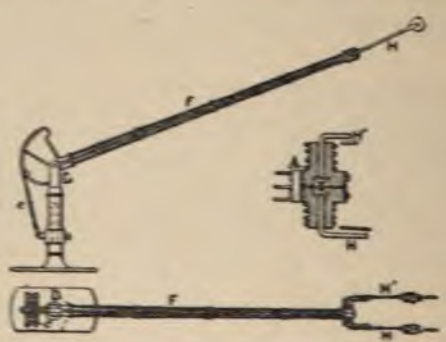

Fig. 65.

empêche les dérivations, tandis que l'induction est réduite par suite de l'action différentielle exercée par le fil de tramway sur les deux conducteurs de chaque circuit téléphonique. M. Rheins a proposé de relier chaque abonné aux fils inutilisés du réseau téléphonique, ceux-ci étant mis à la terre au bureau central, de manière à former un retour commun. Enfin, M. Piérard a indiqué une disposition qui permet de substituer le fil de retour commun au retour par la terre, au moment où l'abonné décroche son téléphone.

Les tramways qui utilisent les courants alternatifs produisent des effets d'induction tellement intenses qu'ils nécessitent dans leur voisinage l'emploi de câbles téléphoniques à double fil.

Il arrive parfois qu'un fil de téléphone en tombant sur un fil de tramway amène dans les récepteurs des courants susceptibles de brûler les bobines de ceux-ci. On prévient cet accident en munissant les postes téléphoniques d'un fil fusible de petit diamètre, qui peut également servir, avec le parafoudre, à soustraire les appareils aux dangers des décharges atmosphériques.

Un autre préservatif consiste à tendre au dessus du fil de trolley

des fils de garde parallèles ; mais le maintien de ces fils supplémentaires complique les réseaux aériens. La Compagnie Thomson-Houston applique à la partie supérieure du fil de trolley, aux endroits où celui-ci passe sous des fils téléphoniques, de minces lattes de bois, maintenues par des crampons.

Corrosions dues au retour par la terre. Emploi des feeders de retour, du système à trois conducteurs et des courants alternatifs. — L'emploi des courants continus et du retour par la terre amène des corrosions dans les conduites métalliques voisines des rails. En effet, si une partie du courant de retour est dérivée par ces canalisations, l'eau du sol est électrolysée entre celles-ci et les rails et l'oxygène attaque les parties qui jouent le rôle d'anodes. Pour localiser autant que possible la zone dangereuse dans les environs de l'usine et limiter l'étendue des surfaces attaquées, on relie le pôle négatif des dynamos génératrices aux rails, comme l'indique la fig. 66.

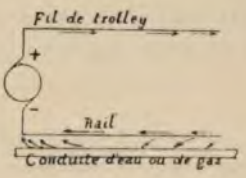

Fig. 66.

On voit que le courant ne peut revenir par une conduite qu'en traversant deux fois la masse électrolytique qui la sépare des rails. Or, comme la force électromotrice de polarisation produite à chaque passage est voisine de 2 volts et comme la masse oppose une résistance absorbant de 1 à 3 volts, on peut empêcher les dérivations en faisant en sorte qu'entre la partie des rails la plus éloignée de l'usine et celle la plus rapprochée la différence de potentiel ne dépasse pas 5 à 7 volts. Il faut donc ménager aux conducteurs de retour du courant la plus grande conductibilité possible par l'emploi de rails de faible résistibilité réunis par des éclisses électriques dont la section est en rapport avec les courants qui doivent les

traverser. Voici les divers moyens recommandés pour éviter les corrosions [1].

1° L'emploi de lignes de trolley doubles supprime toute dérivation, mais les inconvénients qu'il occasionne l'a fait rejeter.

2° Lorsque la ligne a peu de longueur et que le trafic est faible, des rails suffisamment conducteurs et pourvus d'un bon éclissage électrique suffisent pour éviter une différence de tension trop grande entre les extrémités de la ligne. La soudure des rails réduit au minimum la résistance du retour. Certains auteurs ont conseillé de relier le pôle négatif des générateurs aux rails et aux conduites métalliques voisines. Ainsi, le courant qui pourrait éventuellement revenir par ces tuyaux retournerait à la dynamo par des conducteurs métalliques sans retraverser la terre, et les tuyaux ne pourraient pas servir d'anodes, comme c'est le cas aux environs de l'usine dans la fig. 66. Toutefois, ce système présente un danger. Les courants revenant par les conduites sont renforcés par suite de la suppression d'une des deux forces contre-électromotrices de polarisation. Si le courant de retour est assez intense et si un joint des tuyaux est mauvais conducteur, l'un des tronçons joue le rôle d'anode, fig. 67, et devient le siége d'une corrosion.

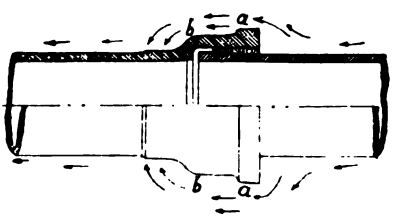

Fig. 67

3° Lorsque la longueur des lignes dépasse 4 à 5 km ou que le trafic est considérable, il faut adopter d'autres dispositions. Le mieux est de faire partir de l'usine des couples de feeders allant

[1] Potier, *Bulletin de la Soc. des Electr.*; Mai 1896.
Blondel, *Eclairage Electrique*; 18 juillet 1896.

se souder les uns aux sections du fil de trolley, les autres aux sections correspondantes des rails. Si les feeders de retour donnent tous lieu à la même perte en volts, les diverses sections de rails sont dans les mêmes conditions de tension électrique, quel que soit leur écartement de l'usine, et, par suite, il n'y a pas d'échange de courants entre les diverses parties de la voie. Les feeders de retour étant soumis à une différence de potentiel faible, n'ont pas besoin d'un isolement aussi soigné que celui des feeders d'aller. On voit que ce procédé revient à unifier la tension dans les rails comme on le fait dans les fils distributeurs d'un réseau électrique.

4° Si les feeders de retour présentaient de grandes inégalités de longueur, il serait dispendieux d'y admettre la même chute de tension. Pour arriver à réduire celle-ci dans les plus longs sans employer un poids de cuivre abusif, M. Brown a proposé de les raccorder, à l'usine, au pôle négatif de petites dynamos communiquant elles-mêmes, par leur pôle positif, avec le pôle négatif des génératrices principales, de manière à soutirer l'électricité de ces feeders et à abaisser leur potentiel. Ce système de sous-volteurs est tout à fait analogue aux survolteurs utilisés dans les réseaux pour égaliser le voltage de distribution.

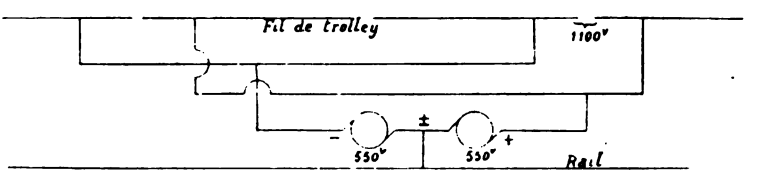

Fig. 68.

5° Parmi les remèdes proposés pour éviter les corrosions, signalons encore la distribution à 3 conducteurs par deux machines de 550 volts en tension, fig. 68. Le point de jonction des machines est relié à la terre ; les pôles extrêmes sont réunis à des sections voisines du fil de trolley dans une ligne à simple voie et aux fils voisins dans une ligne à double voie. Ainsi, les courants de retour, au lieu de revenir à l'usine, passent par les sections de rails correspondant aux sections de fil aérien. Ce dispositif, employé à Portland (Orégon), revient à porter à 1 000 volts, au lieu de 500,

la tension de distribution. Il se répand peu, à cause des difficultés de construction amenées par l'isolement des sections positives et négatives du fil de trolley, particulièrement aux croisements ; c'est une raison analogue à celle qui a fait rejeter le système à double trolley.

6° Une solution applicable à une ligne de grande longueur consiste à établir des conducteurs primaires à haute tension alimentant des sous-stations par transformateurs produisant du courant continu à 500 volts pour les fils de trolley.

Une transmission par courants polyphasés de haut voltage avec transformateurs statiques dans les sous-stations s'indique dans ce cas, ces transformateurs desservant des commutatrices qui reçoivent les courants polyphasés par leur commutateur à bagues et débitent du courant continu par leur collecteur Gramme.

7° Enfin, une dernière solution consiste à faire usage sur les voitures de tramway de moteurs alimentés par des courants alternatifs dont les effets d'électrolyse sont négligeables.

M. Brown a installé à Lugano un tramway à courants triphasés. Ceux-ci arrivent aux voitures par un double trolley et deux fils aériens, les rails servant de troisième conducteur. Les alternomoteurs démarrent au moyen de résistances dans l'induit. Ils ne sont pas aussi favorables à ce point de vue que les moteurs en série à courant continu, mais, par contre, la suppression du collecteur divisé et son remplacement par un commutateur à bagues suppriment la cause de dérangements la plus importante des moteurs de tramway. En outre les alternomoteurs sont autorégulateurs de vitesse. Le grand écueil des courants triphasés est la nécessité du double trolley, dont on a vu plus haut les inconvénients.

Pour atténuer ceux-ci, M. Brown a interrompu les communications électriques aux croisements des lignes, les voitures passant en ces endroits grâce à leur inertie. Les aiguillages sont également supprimés dans la voie aérienne : on déplace le double trolley d'une ligne aérienne vers la ligne voisine.

Les courants alternatifs circulant dans les fils de prise de courant occasionnent, dans les fils téléphoniques parallèles, des courants d'induction qui doivent être combattus par l'éloignement de ces fils ou par l'adoption de circuits métalliques pour les téléphones.

Par contre, les courants polyphasés ont le grand avantage de permettre la transmission de l'énergie à de grandes distances, sous une tension élevée, et l'abaissement du potentiel sur les fils de prise de courant à l'aide de transformateurs statiques échelonnés le long de la voie. Les courants alternatifs réduisent les étincelles d'extra-courant et simplifient la construction des contrôleurs. Les moteurs polyphasés réalisent un freinage automatique ; l'énergie électrique produite par les moteurs dans les pentes est renvoyée sur la ligne sans qu'il soit nécessaire de faire des connexions spéciales.

Traction par accumulateurs. Examen des conditions techniques. Systèmes divers. Accumulateurs à charge rapide.— Au lieu de maintenir les voitures d'une ligne en communication avec des générateurs situés à poste fixe, l'on peut charger, à l'aide de ceux-ci, des accumulateurs qu'on hisse sur les véhicules à remorquer.

Ce système n'entraîne pas les inconvénients qu'on reproche aux conducteurs électriques dans les tramways urbains, et il assure une complète indépendance des divers véhicules. De plus, les machines génératrices exigées sont moins puissantes que dans les procédés directs de traction, puisqu'elles fonctionnent sous un régime constant et dans les meilleures conditions de rendement. La possibilité de modifier le groupement des éléments secondaires au moyen d'un contrôleur approprié rend inutiles les résistances de démarrage nécessaires dans les tramways à prise de courant. Les accumulateurs se prêtent, en outre, à la récupération de l'énergie dans les pentes [1]. L'avantage théorique des accumulateurs croît avec la longueur de la voie, car les frais n'augmentent pas avec cet élément, comme dans le cas de la traction par prise de courant. Enfin, la traction par accumulateurs s'indique lorsque les véhicules ont un itinéraire variable, ce qui arrive avec les omnibus et les voitures de pavé, ainsi qu'avec les embarcations maritimes ou fluviales. La traction par accumulateurs est seule possible dans

---

[1] G. Pélissier, *Eclairage Electrique*; t. VI, p. 49.

les mines grisouteuses, les systèmes à prise de courant occasionnant des étincelles capables de déterminer des explosions.

Malheureusement, le poids des accumulateurs a été, jusqu'à présent, un obstacle sérieux à la généralisation de leur emploi.

Les accumulateurs n'ont pas une puissance spécifique supérieure à 5 watts par kilogramme.

Cherchons le poids d'accumulateurs que doit, dans ces conditions, porter une voiture, pesant 4 tonnes avec le moteur électrique, pour gravir une rampe de 3 pour 100 à la vitesse de 10 kilomètres à l'heure.

En appliquant la formule

$$P_{watts} = \frac{p\,v\,(f + i)}{0{,}102},$$

et en supposant $f = 0{,}012$, on a, en appelant x le poids cherché,

$$5\,x = \frac{(4000 + x)\,\frac{10\,000}{3\,600}\,(0{,}012 + 0{,}03)}{0{,}102};$$

d'où pour x près de 1,2 tonne. Le poids des accumulateurs est donc égal au double du poids du moteur et de la transmission. La puissance requise est de 6 kilowatts ou 8,15 chevaux.

Les voitures de tramway demandent environ 450 watts-heures par voiture-kilomètre. En admettant cette base, malgré la surcharge trouvée dans le cas présent, et en estimant à 20 watts-heures par kilogramme l'énergie spécifique des couples secondaires, on voit que le poids d'accumulateurs ci-dessus est capable de produire

$$\frac{1\,200 \times 20}{450} = 53{,}3 \text{ voitures-kilomètres},$$

soit à peu près la moitié du parcours journalier d'une voiture dans nos grandes villes.

Les trépidations ont une tendance à faire tomber les matières actives des piles secondaires, particulièrement des plaques positives; c'est pourquoi l'on donne souvent à celles-ci la forme à augets qui retient les oxydes. Les positifs à formation Planté présentent les meilleures conditions de solidité. Pour éviter que les

chocs ne projettent le liquide hors des vases, on couvre les éléments ou l'on donne aux récipients une hauteur exceptionnelle.

Les couples secondaires sont disposés dans des caisses spéciales, soit sous le truc, entre les moteurs, soit sous les banquettes. Dans ce dernier cas, on peut les retirer en ouvrant des panneaux à charnières sur les côtés du véhicule, mais ils exigent des manœuvres plus complexes et exposent davantage les caisses aux détériorations.

Deux procédés sont en usage pour le chargement des accumulateurs : le système à charge lente, qui demande à peu près autant de temps pour la charge que pour la décharge et oblige à remplacer les batteries à intervalles périodiques, et le système à charge rapide, au moyen duquel les accumulateurs peuvent être rechargés sur les voitures mêmes en une dizaine de minutes. Le tableau suivant renseigne les facteurs qui entrent en ligne de compte dans les deux cas. On voit que le second système, qui exige des accumulateurs robustes à positifs Planté, nécessite un poids d'éléments considérable, à moins qu'on ne renouvelle fréquemment la charge.

		Charge lente.	Charge rapide
Débit en ampères par kg d'électrodes	normal	4	4,5
	temporaire	8	9
Puissance en watts par kg de poids total	normale	5	5
	temporaire	10	10
Energie en watts-heures par kg de poids total	. . . . .	22,5	4,5
Rendement	. . . . .	0,70	0,65

Avec ces données, il est possible de calculer, pour une batterie et un véhicule donnés, la durée maxima du parcours et les vitesses réalisables en palier et en rampes. Les résultats montrent que les voitures à accumulateurs ne peuvent gravir les rampes de 2 à 4 pour 100 qu'à des vitesses restreintes et que leur emploi rationnel est limité aux lignes à rampes minimes.

La comparaison entre la traction directe et la traction par accumulateurs doit, au point de vue technique, être basée à la fois sur le rendement des appareils et sur le rapport de la charge utile au poids total des véhicules.

Des expériences faites aux Etats-Unis par MM. Bell, Sprague et Hale, il résulte que le rapport de l'énergie électrique disponible aux véhicules à la puissance indiquée aux cylindres des machines à vapeur est voisin de 0,65. En estimant à 0,75 le rendement maximum des moteurs et de leurs transmissions, le rendement total devient $0,65 \times 0,75$, c'est à dire près de 50 pour 100. Dans le cas de la traction par accumulateurs, les machines génératrices ont un rendement meilleur que dans le cas précédent et l'on peut compter sur un rapport égal à 0,80 entre la puissance absorbée par les batteries et la puissance indiquée aux machines à vapeur. Les accumulateurs étant soumis à un régime forcé et variable présentent un rendement qui ne dépasse guère 70 pour 100. En conservant 0,75 pour le rendement des moteurs, on obtient un rendement final de

$$0,80 \times 0,70 \times 0,75 = 0,42.$$

Considérons une voiture de 5 mètres, pouvant contenir 30 personnes donnant un poids total de 1 800 kg, et pesant, pour la caisse seule, 1 800 kg, soit, avec le moteur, les transmissions et les voyageurs, 4 300 kg. Une telle voiture exigera une surcharge d'au moins 1 500 kg d'accumulateurs dans le système de traction indirecte.

Appelons coefficient caractéristique d'un système le produit du rendement total par le rapport du poids utile (caisse et voyageurs) au poids total.

On aura, dans le système direct,

$$0,50 \times \frac{1\,800 + 1\,800}{4\,300} = 0,418,$$

et, dans le système par accumulateurs,

$$0,42 \times \frac{1\,800 + 1\,800}{4\,300 + 1\,500} = 0,26.$$

Ces chiffres, qui n'ont rien d'absolu, montrent que la comparaison est tout à l'avantage de la traction directe.

La traction par accumulateurs fut tentée d'abord en France par M. Raffard. Dans cette application, des éléments Faure étaient disposés dans des caisses sous les banquettes des voitures.

Actuellement, les tramways de Paris exploitent plusieurs lignes par des voitures à accumulateurs. Sur une ligne montée par la Société pour le travail électrique des métaux et où les voitures ont 52 places, on a installé 56 éléments secondaires dans une caisse supportée, sous la voiture, entre les essieux. Le poids total de la voiture automotrice se répartit comme suit :

Voiture	6 500 kg
Batterie	1 700 »
Voyageurs	3 500 »
Total. . .	11 700 kg

La provision d'énergie permet un voyage aller et retour, soit en tout 20 km. Au terminus, 2 hommes remplacent la caisse des accumulateurs épuisés par une caisse de rechange. A l'avenue de Saint-Ouen, où la dépense en rampe est de 976 watts-heures, la descente effectuée avec les machines agissant comme génératrices-freins permet de récupérer 385 watts-heures dans les accumulateurs.

D'autres lignes parisiennes ont été équipées par la Compagnie générale de traction et d'électricité, qui utilise le système d'accumulateurs à charge rapide déjà essayé à Hanovre.

Si l'on charge les accumulateurs sous une tension constante de 2,7 volts environ par élément, on obtient un courant très intense au début et qui va en s'affaiblissant au fur et à mesure de l'accroissement de la force contre-électromotrice. Les couples prennent ainsi très rapidement une charge qui est, toutefois, inférieure à celle qu'ils sont susceptibles de recevoir dans les conditions habituelles. A la condition de se contenter d'une capacité réduite, l'on peut recharger ainsi très rapidement une pile secondaire. La diminution de la capacité oblige naturellement à accroître le poids de la batterie pour un travail donné.

Les voitures à 52 places de la Compagnie générale de traction et d'électricité reçoivent, sous les banquettes, 200 éléments Tudor ; chacun de ceux-ci comporte 5 plaques pesant ensemble 15 kg et la batterie entière atteint le poids de 3 600 kg, ce qui porte le poids total du véhicule rempli à 14 tonnes. La capacité

des éléments est de 32 ampères-heures au régime spécial de charge rapide.

Les accumulateurs Tudor employés sont d'un modèle nouveau. Les plaques négatives à augets sont du type Faure. Les plaques positives en plomb pur sont creusées de rainures profondes très rapprochées, de manière à présenter une surface active de 20 dcm² par kg; elles sont formées suivant le système Planté et peuvent supporter des décharges excessives sans déformation.

Lorsqu'une voiture arrive au terminus, la batterie, qui reste sur la voiture, est mise en relation avec des feeders venant de l'usine. On évite que les vésicules liquides dégagées pendant la charge ne se déposent sur les éléments secondaires et les parois voisines, en aspirant l'air par des ventilateurs électriques disposés à l'une des extrémités de la voiture. Le courant de charge est, au début, de 120 ampères, soit 8 ampères par kg de plaques. La charge est terminée en 15 minutes; elle permet un voyage aller et retour d'environ 13 km.

Systèmes mixtes. Fils aériens et caniveaux. Trolley et accumulateurs. — Depuis quelques années, on a cherché, dans les villes où les municipalités n'autorisent pas les lignes aériennes dans les quartiers centraux, à combiner des lignes mixtes, pourvues de prises de courant aériennes dans la banlieue et dont l'exploitation se fait par caniveau ou par accumulateurs dans le centre.

La Maison Siemens a installé, à Berlin, une ligne de tramway présentant 6 km de fil aérien avec prise de courant par archet et 2 km de voie à caniveau. Au raccordement, le radier du caniveau se relève insensiblement et l'appareil de prise de courant souterrain bascule autour d'un axe horizontal jusqu'à ce qu'il sorte entièrement. L'archet est alors en prise avec le fil aérien.

Dans la combinaison du trolley et des accumulateurs, qui a été réalisée à Hanovre et à Dresde, l'on peut ou adopter des accumulateurs à charge rapide, rechargés aux extrémités de la ligne, ou utiliser des accumulateurs à grande capacité spécifique, par suite plus légers, qu'on charge en cours de route par la ligne aérienne, ce qui est possible chaque fois que la longueur relative de celle-ci

est suffisante. C'est là un moyen de régulariser le débit de l'usine électrique. Il faut, dans ce cas, prendre des précautions pour que les gaz libérés pendant la charge des couples ne gênent pas les voyageurs. A Hanovre, les éléments, placés sous les banquettes, sont recouverts individuellement d'un couvercle en caoutchouc et les caisses contenant les accumulateurs sont ventilées par des tuyaux débouchant sur le toit du véhicule.

Chapitre III.

ÉLÉMENTS D'UN PROJET DE TRACTION DE TRAMWAY.

Choix des machines génératrices. Usine électrique. — La puissance requise par une voiture de tramway est extrêmement variable. L'intensité du courant absorbé par les électromoteurs passe continuellement d'une valeur nulle, aux moments des arrêts, à des valeurs atteignant de 3 à 4 fois la valeur moyenne, aux moments des démarrages. Ainsi à Richmond, à Cleveland et à Scranton, où les vitesses moyennes sont de 9,5, 14 et 9 kilomètres à l'heure, les puissances moyennes fournies aux voitures de 32 places sont respectivement de 6,5, 6,6 et 7,4 chevaux, et les puissances maxima exigées dans les rampes de 25,6, 15 et 19,2 chevaux. A Richmond, la mesure a été faite sur une rampe de 9 pour 100 avec une charge de 3 900 kg; à Cleveland, sur une rampe faible avec une charge de 4 450 kg, et à Scranton, sur une rampe de 7 pour 100 avec une charge de 4 000 kg.

On compte souvent sur une dépense moyenne de 450 watts-heures par voiture-kilomètre pour une petite voiture chargée de 32 places et de 700 watts-heures pour une grande voiture de 50 places. Les pertes d'énergie en ligne sont moyennement de 10 pour 100.

En Europe, on estime à 70 ou 80 watts-heures par tonne-kilomètre la dépense sur les voies à faibles déclivités et à 90 ou 100 watts-heures celle sur les lignes à rampes moyennes. Lorsque la vitesse est de 12 kilomètres à l'heure, les démarrages entrent dans les chiffres précédents pour 6 watts-heures par tonne et par arrêt.

Les praticiens estiment la puissance des génératrices, ordinairement à 500 volts, d'après le *courant moyen*, qui se déduit directement de l'énergie moyenne nécessaire par voiture-kilomètre, de la vitesse moyenne et du nombre de voitures, et le courant maximum calculé en supposant les voitures en démarrage dans les positions les plus défavorables.

Les variations du courant étant très brusques, il ne peut être question de régler les dynamos à la main, et il convient de faire usage à l'usine de machines génératrices hypercompound, de manière à maintenir la tension normale sur les conducteurs de prise de courant.

Lorsqu'un grand nombre de voitures circulent simultanément sur la ligne, il tend à se produire une certaine égalisation dans la demande d'énergie ; mais, si le nombre des véhicules est restreint, on doit prévoir des machines motrices capables de développer une puissance très supérieure à la puissance normale. Alors que, dans un grand réseau de tramways, l'on compte en moyenne 15 chevaux électriques à l'usine par voiture de 50 places, on doit tabler sur le double dans un petit réseau. Il faut, en outre, disposer d'une réserve suffisante pour les cas d'accidents.

Les frottements des machines ont une grande influence sur le rendement de l'usine électrique. Si, par exemple, ils amènent une perte de 10 pour 100 de la puissance totale en pleine charge, ils absorbent environ 30 pour 100 à tiers de charge ; d'où un résultat final médiocre. Les courroies, qui donnent lieu à une perte constante d'environ 5 pour 100 de la pleine charge, sont à remplacer par l'attaque directe.

Les volants doivent avoir une action énergique, afin de faire face aux variations brusques de l'effort résistant. On leur donne souvent un poids de moitié supérieur à celui des volants adoptés dans le cas de charges constantes. Il est nécessaire d'employer des volants

particulièrement robustes pour éviter les bris en cas d'à-coups. Dans les machines à grande vitesse, les volants pleins sont préférables, à cet égard, aux volants à rayons.

La détente est calculée de manière à réaliser le minimum de consommation par cheval-heure indiqué pour la puissance normale, le moteur fonctionnant avec une forte admission pour développer la puissance maxima. On peut aussi adopter une détente constante et faire varier la pression par étranglement de la vapeur, ce qui demande un moindre effort au régulateur. Certains constructeurs font agir ce dernier sur un servo-moteur pour renforcer son action et hâter le réglage lors des variations de charge. Les régulateurs à ressorts dans le volant sont également très énergiques.

Un moteur du genre Corliss ne serait pas économique pour les petites lignes, car une telle machine a des limites d'admission assez restreintes et on serait amené, pour faire face à la demande maxima, à adopter de grands moteurs dont le rendement organique serait faible sous la charge normale.

Une solution préconisée par M. Van Vloten consiste à disposer, à l'usine génératrice, une batterie d'accumulateurs destinée à fournir l'énergie électrique dépassant la demande normale. On obtient de la sorte un volant d'énergie électrique très utile dans les petites stations. Dans ce cas, les appareils producteurs de l'électricité développent une puissance constante et les accumulateurs absorbent l'excès de puissance fournie par les machines ou suppléent à l'insuffisance de celles-ci. Cet arrangement, qui assure un excellent rendement aux appareils générateurs, entraîne, par contre, une dépense d'immobilisation plus forte que le système d'alimentation directe.

Il existe, à Zurich, une exploitation de traction avec accumulateurs électriques à l'usine, due à la Société d'Oerlikon. Un régulateur automatique fait varier le nombre des éléments secondaires, selon la force électromotrice de ceux-ci.

Une autre combinaison a été réalisée à Fontainebleau par M. Pirani. Une batterie d'accumulateurs est placée en dérivation par rapport aux dynamos génératrices. En série avec la batterie secondaire se trouve l'induit d'un survolteur à excitation différentielle. L'un des circuits inducteurs est dérivé sur les accumu-

lateurs, l'autre est en série avec la ligne. En marche normale, les deux enroulements exercent des effets égaux et opposés, l'induit du survolteur joue le rôle d'une résistance passive et les accumulateurs ne fonctionnent pas. Si la ligne est surchargée, l'action de la bobine magnétisante en série prédomine et fait produire au survolteur une force électromotrice qui s'ajoute à celle des accumulateurs et détermine ceux-ci à venir en aide aux machines génératrices. Si, au contraire, la ligne est déchargée, c'est l'effet de l'enroulement en dérivation qui se fait sentir; la force électromotrice du survolteur est intervertie et les génératrices envoient un courant de charge dans la batterie secondaire.

La puissance requise à l'usine productrice dépend du nombre des véhicules circulant sur la ligne. Voici, d'après MM. Crosby et Bell [1], quelques renseignements intéressants à cet égard.

Dans le cas d'une ligne de 6 à 7 km, comportant 5 voitures de 5 tonnes marchant à l'allure de 13 km à l'heure sur des rampes maxima de 5 à 6 pour 100, on peut admettre que le rapport entre la demande moyenne de puissance électrique et la demande maxima est un tiers. Dans ces conditions, il faut pourvoir l'usine de machines motrices capables de développer, à un moment donné, 100 chevaux environ. On peut adopter un type de machine à grande vitesse dont les masses en mouvement sont faibles, de manière à réduire les frottements et à obtenir un bon rendement moyen avec des charges variables. La puissance reconnue nécessaire dans cet exemple peut être concentrée dans une seule machine; mais il faut une réserve égale pour parer aux cas d'accidents. Deux moteurs développant chacun 100 chevaux avec 0,25 d'admission seront choisis. Les chaudières, au nombre de deux également, seront calculées sur la base d'une puissance totale de 100 à 120 chevaux, afin de fournir de la vapeur sèche lors des brusques variations de consommation. Enfin, les deux dynamos génératrices seront prévues aussi pour une puissance un peu supérieure à celle des moteurs, afin de supporter les à-coups accidentels.

---

[1] Crosby et Bell, *The Electric Railway*; Johnston, New-York.

On adoptera, par exemple, deux dynamos d'une puissance maxima de 80 kilowatts, fournissant encore un rendement acceptable au débit exigé normalement.

Lorsqu'une ligne de tramway comporte de 30 à 35 voitures, le rapport entre la demande de puissance moyenne et la demande maxima arrive à près de 0,50. Il est alors possible d'utiliser les machines du genre Corliss. On aura soin de proportionner la grandeur des unités motrices de manière à ménager un groupe de réserve. Les machines ne tourneront ensemble qu'aux heures où le trafic est le plus important. Pendant une partie de la journée, l'on peut généralement arrêter quelques unités pour procéder au nettoyage.

Dans les villes où le nombre des véhicules atteint la centaine, l'on fait ordinairement usage de grandes voitures, d'une contenance double de celle des voitures ordinaires. Le rapport entre la charge moyenne et la charge maxima est alors voisin de l'unité et l'on peut recourir aux machines à triple ou à quadruple expansion et à condensation, donnant lieu à la consommation la plus réduite. On a augmenté progressivement la puissance des groupes moteurs dans les grands réseaux de tramways ; on va jusque 1 500 kilowatts aux Etats-Unis. On peut alors employer des dynamos qui ont des rendements atteignant près de 90 pour 100 à quart de charge.

Quel que soit le nombre des véhicules, on étudiera la position de l'usine en ayant égard au coût du terrain, à celui des conducteurs et aux facilités d'accès du combustible et de l'eau. Autant que possible, l'on se rapprochera du milieu de la ligne en vue de réduire la dépense de cuivre.

Les bâtiments de l'usine sont le plus souvent à un étage ; ils doivent être disposés de manière à permettre les agrandissements.

Les bâtiments comprennent la halle des machines, la chambre de chauffe et, éventuellement, des bureaux et un atelier de réparations. Les chaudières sont alignées devant le dépôt de combustible. Au dessus des machines règne un pont roulant destiné à faciliter le montage et les réparations.

Les fondations des dynamos et des moteurs doivent être particulièrement solides, eu égard aux efforts brusques demandés

à ces appareils. On prendra les précautions requises pour isoler les dynamos et empêcher la propagation des vibrations.

Le tableau de distribution est placé devant les dynamos, à portée de l'électricien qui conduit celles-ci. Ce tableau comporte, par machine, un rhéostat de champ pour l'excitation, un interrupteur à main, un voltmètre et un ampèremètre. Les feeders sont munis d'interrupteurs automatiques fonctionnant en cas de surcharges telles que celle produite par un court-circuit. S'ils sont aériens, on les couvre par des parafoudres. L'emploi d'enregistreurs est utile pour contrôler le débit des génératrices. Les dynamos hypercompound sont pourvues de fils compensateurs pour éviter le renversement des pôles.

Souvent il arrive que les interrupteurs automatiques fonctionnent plusieurs fois de suite, parce que les voitures se mettent simultanément en marche après un arrêt et que les courants de démarrage sont intenses. Lorsque les conducteurs s'aperçoivent que le courant de ligne est interrompu, ce dont ils peuvent s'assurer à l'aide des lampes électriques des voitures, ils doivent attendre, avant de fermer le circuit des moteurs, un nombre de secondes variable avec la position des véhicules sur la ligne.

En ce qui concerne le calcul des conducteurs électriques, on prendra en considération l'importance de la ligne et la perte de tension consentie. Avec la tension habituelle de 500 volts, on admet une perte maxima d'environ 50 volts. Il en résulte que le fil de trolley, en cuivre dur de 8,5 mm de diamètre, ne peut être employé comme conducteur unique que dans les lignes courtes et peu chargées. Pour les lignes moyennes et longues, on fait usage de feeders ou d'un câble distributeur alimenté par des feeders et relié, de distance en distance, au fil de trolley, lequel est divisé en sections de 400 à 500 m. La perte maxima de 50 volts est répartie sur un feeder et les conducteurs qui le séparent de la voiture la plus éloignée. Un calcul simple indiquera, dans chaque cas, la section à donner aux divers conducteurs. Lorsque les lignes sont très étendues, il faut, pour élever la tension, recourir au système à 3 conducteurs ou à des sous-stations de transformateurs. On n'oubliera pas de proportionner les rails, les éclisses électriques, les feeders de retour et les sous-volteurs de manière à éviter

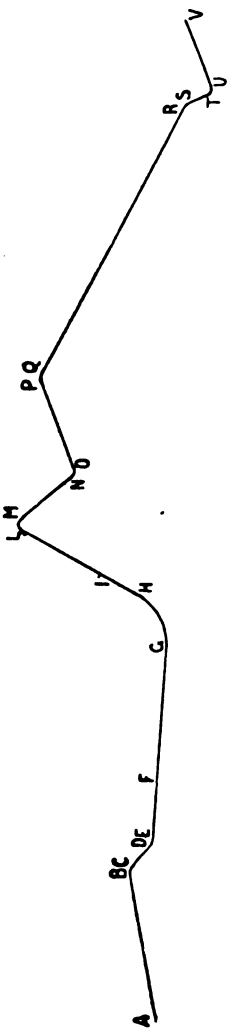

Fig. 69.

une différence de potentiel supérieure à 5 volts entre deux points quelconques des rails.

Quant à la construction des lignes, on s'en rapportera aux règles générales données plus haut.

Calcul d'un avant-projet de traction de tramway. — *Données.* Ligne à double voie de 3 100 m de longueur ; système de traction par fil de trolley avec feeders souterrains ; départs par intervalles de 4 minutes ; 3 arrêts intermédiaires ; voitures de 32 places ; vitesse de 13 km à l'heure [1].

Le plan de la voie est représenté dans la fig. 69 et le profil dans la fig. 70 I.

Détermination de la puissance des moteurs. A l'aide des données ci-dessus, on peut calculer l'énergie totale à fournir aux essieux d'une voiture pendant un voyage aller et retour, et, par suite, la puissance moyenne à développer.

Soient P = 6,3 tonnes, le poids des voitures de 32 places, voyageurs et matériel électrique compris, f le coefficient de traction dont nous admettrons que la valeur varie avec le rayon, R mètres, des courbes de la voie suivant la formule $\frac{450}{R}$, i la pente en mm par m et v la vitesse en kilomètres par heure.

La formule

$$p = \frac{P\,v}{270}(f \pm i) = 0{,}303\,(f \pm i)$$

(1) Cet avant-projet a été étudié par M. Del Proposto, assistant à l'Institut Montefiore. Les calculs ont été faits à la règle de 26 cm.

·met de déterminer la puissance utile en chevaux requise par une ıture en tous les points du parcours, non comprise l'énergie :essaire au démarrage.

En pratique, la vitesse n'est pas uniforme ; elle est diminuée ns les parties difficiles de la ligne. Le calcul fait dans l'hypothèse ıne vitesse constante de 13 km à l'heure conduit à un travail ıximum. La formule précédente a servi à calculer le tableau ivant.

Longueur des trajets — m	Rayon des courbes — m	Pente — mm par m	Durée des trajets — Minutes	Puissance requise — Chevaux		Travail à développer — Chevaux-minutes	
				V→A	V→A	A→V	V→A
400	∞	15	1,84	9,05	—	16,65	—
15	15	0	0,07	9,05	9,05	0,63	0,63
80	∞	0	0,37	4,53	4,53	1,63	1,63
7,5	12	0	0,03	11,20	11,20	0,34	0,34
150	∞	0	0,69	4,53	4,53	3,13	3,13
350	∞	20	1,62	—	9,05	—	14,65
170	150	10	0,78	2,10	8,25	1,56	6,43
50	∞	10	0,23	0,52	7,55	0,12	1,74
350	∞	50	1,62	19,90	—	32,20	—
27	14	50	0,13	25,30	—	3,30	—
90	∞	10	0,42	7,55	0,52	3,17	0,22
24,5	20	10	0,12	4,53	10,60	0,54	1,27
250	∞	10	0,15	0,52	7,55	0,60	8,68
15,5	18	10	0,07	4,80	10,80	0,36	0,76
800	∞	20	3,68	—	10,60	—	39,00
17	20	0	0,08	7,55	7,55	0,60	0,60
65	∞	0	0,30	4,53	4,53	1,36	1,36
45,5	30	0	0,21	6,55	6,55	1,40	1,40
193	∞	0	0,89	4,53	4,53	4,03	4,03
3 100						71,62	85,77

L'énergie totale à fournir aux essieux d'une voiture pour un voyage aller et retour est de

$$71{,}62 + 85{,}77 = 157{,}4 \text{ chevaux-minutes.}$$

L'énergie supplémentaire, requise par les 8 démarrages du voyage, est

$$8\,\frac{M\,v^2}{2} = 4\,\frac{6\,300}{9{,}81}\left(\frac{13\,000}{3\,600}\right)^2\frac{1}{75} = 447 \text{ chevaux-secondes}$$
$$\text{ou } 7{,}46 \text{ chevaux-minutes.}$$

Il est à remarquer qu'une partie de cette énergie est restituée aux ralentissements, lorsque la voiture se meut par son inertie ; mais une partie est absorbée par les freins. Nous admettrons, pour éviter tout mécompte, que les freins en absorbent la totalité.

Le voyage aller et retour, non compris les arrêts, se fait en 28,6 minutes; mais, pendant 7,05 minutes, la voiture roule sur pente sans absorber de courant, de sorte que le temps pendant lequel l'énergie est dépensée est de 21,55 minutes.

La puissance moyenne à développer aux essieux est donc

$$\frac{157{,}4 + 7{,}46}{21{,}55} = 7{,}65 \text{ chevaux.}$$

Si la transmission par engrenages entre les essieux et le moteur est à simple réduction de vitesse, la puissance moyenne demandée au moteur sera

$$\frac{7{,}65}{0{,}90} = 8{,}5 \text{ chevaux.}$$

Le rendement du moteur est évidemment variable pendant la marche. Le tableau précédent montre, en effet, que la puissance à produire pendant un temps relativement long est $\frac{19{,}9}{0{,}9} = 22{,}1$ chevaux, soit 2,6 fois la puissance moyenne. Les démarrages demandent un effort plus considérable encore. C'est pourquoi il conviendra d'adopter un moteur susceptible de développer momentanément 25 chevaux et dont le rendement soit maximum au voisinage de la puissance de 15 chevaux.

En supposant que l'essieu moteur porte 0,53 du poids total, l'adhérence de la voiture permettra de gravir une rampe x telle que

$$0{,}53 \times 120\,P = (12 + x)\,P\,;$$

d'où l'on tire

$$x = 52 \text{ mm par m.}$$

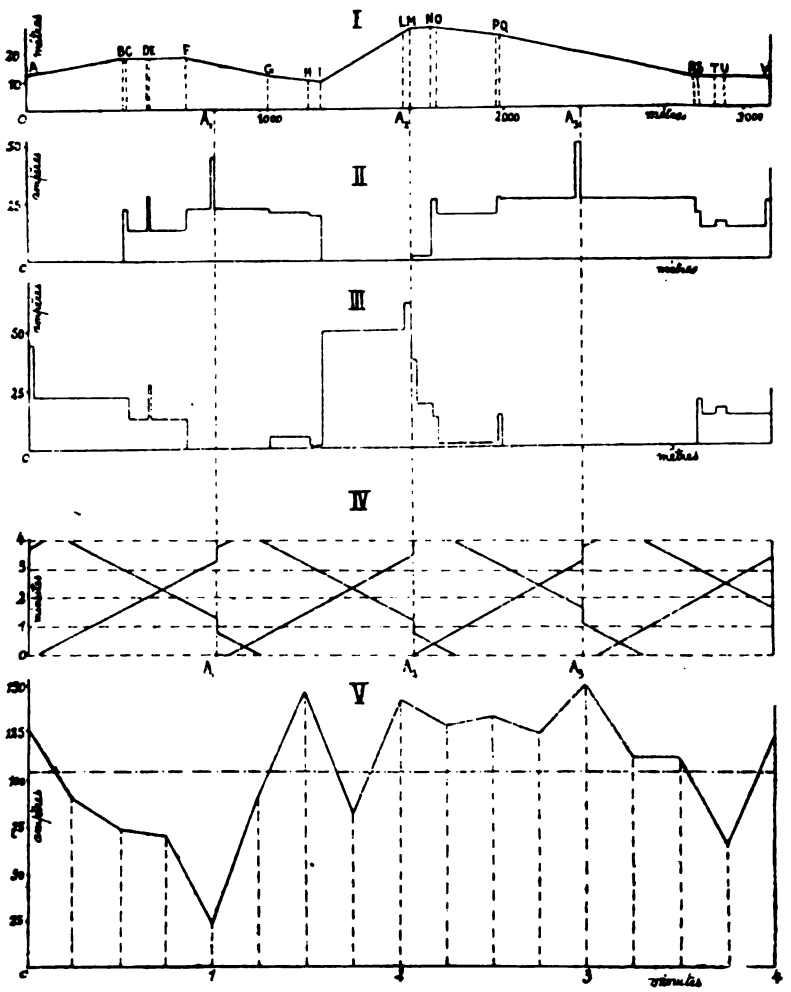

Fig. 70

Dans les démarrages difficiles, on pourra suppléer au manque d'adhérence par l'emploi de sable, projeté par une boîte à sable placée sous la voiture. On a établi les arrêts intermédiaires en

A_1, A_2, A_3, fig. 70 I, de manière à éviter les démarrages dans de mauvaises conditions.

Conditions de fonctionnement. Horaire. Pour déterminer l'horaire des voyages et le nombre de voitures nécessaire, il est commode d'utiliser la méthode graphique. Les positions d'une voiture sont représentées par les abscisses d'une ligne dont les ordonnées figurent les temps, fig. 70 IV; la vitesse est, dans ce cas, proportionnelle à l'inclinaison de cette ligne sur l'axe des temps: la durée des arrêts est figurée par les parties verticales de la ligne.

Par la simple inspection de la figure, l'on juge du nombre de voitures en service et de leur position à chaque instant. On remarquera qu'on a eu soin de faire en sorte que les voitures marchant en sens inverses n'arrivent pas aux arrêts en même temps, afin d'éviter les démarrages simultanés.

Si l'on fait concorder avec la fig. 70 IV les fig. 70 II et 70 III indiquant les courants absorbés par une voiture faisant le parcours dans les deux sens, on trouve immédiatement le courant utilisé par une voiture à un moment donné. Les fig. 70 II et III sont dressées à l'aide du tableau précédent, en admettant une tension de 500 volts et un rapport uniforme de 60 pour 100 entre la puissance aux essieux et celle au fil de trolley. On a supposé que le courant est doublé à la mise en train des voitures. Dans le calcul, nous avons admis que le courant est constant pendant toute la durée du parcours sur un profil donné, ce qui conduit à une dépense plus grande que dans la pratique, où l'on cherche à éviter, autant que possible, de se servir du frein aux arrêts.

Cela posé, l'on peut déterminer, d'après ces diagrammes, le courant total demandé à la station par l'ensemble des voitures à des intervalles de temps rapprochés et dresser les ordonnées Σi du diagramme que tracerait un ampèremètre enregistreur à l'usine centrale. Les résultats du calcul effectué pour des intervalles de temps de 0,25 minute sont représentés dans la fig. 70 V et consignés dans le tableau suivant, qui contient aussi les valeurs de Σi^2 qui serviront dans la suite.

Σi AMPÈRES.	$(\Sigma i)^2$	Σi AMPÈRES.	$(\Sigma i)^2$	Σi AMPÈRES.	$(\Sigma i)^2$
127	16 100	91	8 280	135	18 230
90	8 100	147	21 610	126	15 860
73	5 330	82	6 725	152	23 100
71	5 040	143	20 450	113	12 770
23	529	129	16 640	113	12 770
				65	4 225

Calcul des conducteurs. Le réseau comporte, pour chacune des voies, un fil de trolley divisé en deux tronçons; un feeder alimente les quatre tronçons par l'intermédiaire de sûretés, d'interrupteurs et de parafoudre; un feeder de retour relie, d'autre part, le milieu des rails à l'usine. On n'emploie qu'un seul feeder d'alimentation pour réduire le coût des conducteurs souterrains. La longueur totale des deux feeders de même section est supposée de 500 mètres. La densité de courant δ à admettre dans les feeders peut être déduite de la règle de Kelvin, exprimée par l'équation

$$\delta = \sqrt{\frac{na}{p\rho t}},$$

dans laquelle t désigne le temps, en heures, pendant lequel les feeders sont utilisés annuellement, ρ la résistibilité du cuivre en ohms-cm, p le prix de revient en francs du watt-heure supplémentaire, a le taux de l'intérêt et de l'amortissement de la canalisation par franc, n en francs le coût des câbles par cm de longueur et cm² de section du conducteur [1].

En posant

$$n = 0{,}08 \qquad a = 0{,}1 \qquad p = 0{,}00012$$

on trouve

$$\delta = \sqrt{\frac{0{,}08 \times 0{,}1 \times 60}{0{,}00012 \times 15 \times 365}} = 0{,}855 \text{ ampère par mm}^2,$$

si l'on admet un service journalier de 15 heures.

---

[1] Eric Gerard, *Leçons sur l'Électricité*; chap. I, t. II.

Le tableau ci-contre montre que la racine carrée du moyen carré du courant est 111 ampères.

La section à donner aux feeders est donc

$$\frac{111}{0{,}855} = 13[illegible]\ \text{mm}^2,$$

valeur qui satisfait à la condition de sécurité relative à l'échauffement du cable.

Le courant débité par la station est moyennement de 104 ampères, ce qui montre qu'on n'aurait pas commis une grande erreur en adoptant cette valeur au lieu de la racine carrée du moyen carré.

La chute de potentiel moyenne dans les feeders est

$$\frac{[illegible]}{[illegible]} \times [illegible] = [illegible]\ \text{volts},$$

et la chute maxima atteint [illegible] volts.

La règle de Kelvin pourrait également être appliquée au calcul du fil de trolley comme le montre M. Del Proposto [illegible], mais, outre que la section de ce fil diminue par suite de l'usure, pour ne pas changer le matériel de ligne dans chaque cas particulier, on adopte le fil le plus gros que les villes tolèrent, soit celui de 8,5 mm de diamètre ou 56,75 mm² de section. Les fig. [illegible] II, III et IV permettent de reconnaître quelle est la position des voitures sur la ligne qui occasionne la chute de voltage maxima sur le fil de trolley. On retrouvera aisément que la position la plus défavorable résulte du calcul [illegible] de la somme des produits des courants par les longueurs correspondantes du fil de trolley. La chute de potentiel maxima dans le fil est donc

$$[illegible] = [illegible] \times \frac{[illegible]}{[illegible]} = [illegible]\ \text{volts}.$$

[illegible] est [illegible] par des rails en acier pesant 40 kg au mètre courant [illegible] métrique est de [illegible] ohm. La

[illegible] *Ingénieurs de l'Ecole Montefiore* [illegible]

résistance moyenne d'une éclisse électrique est voisine de 0,00005 ohm. S'il y a 100 joints par km, la résistance de la double ligne de rails est de 0,016 ohm. La résistance kilométrique du fil de trolley, dans lequel la distribution du courant est la même que dans les rails, étant de 0,295 ohm, on voit que la chute de potentiel dans ceux-ci n'est que de $\frac{13,7 \times 16}{295} = 0,75$ volt, valeur très inférieure à la limite tolérée pour éviter les effets électrolytiques dans les conduites souterraines voisines de la ligne.

On déduit de ce qui précède que la chute de potentiel totale dans les feeders, le fil de trolley et les rails ne dépasse pas 24,25 volts.

Dynamos génératrices et moteurs à vapeur. Le réseau sera alimenté par des dynamos hypercompound développant en moyenne 506,7 volts aux bornes et 104 ampères, soit 52,7 kilowatts et au maximum 509,8 volts et 152 ampères, soit 77,5 kilowatts. On adoptera une dynamo pouvant fournir cette puissance maxima et ayant un bon rendement à la puissance moyenne; le type de 60 kilowatts pourra être choisi. Il conviendra d'installer, comme réserve, une seconde machine de même puissance, qui pourra être mise en parallèle avec la première en cas d'un service exceptionnel. En attribuant aux génératrices un rendement de 0,90 et aux courroies de transmission un rendement de 0,95, on arrive, pour la puissance maxima sur l'arbre de commande d'une machine à vapeur, à

$$\frac{77\,500}{736 \times 0,9 \times 0,95} = 123,3 \text{ chevaux.}$$

Il suffira de machines à vapeur d'une puissance indiquée d'une centaine de chevaux à 0,25 d'admission, pourvues d'un volant dont l'inertie soit suffisante pour permettre au régulateur de maintenir une vitesse sensiblement uniforme à toutes les charges.

Chapitre IV.

CHEMINS DE FER ÉLECTRIQUES. (1)

Limites d'emploi des locomotives à vapeur. — On appelle vitesse moyenne de marche d'une locomotive, le rapport du parcours total effectué au temps réel de marche, les arrêts étant décomptés.

Le rendement mécanique d'une locomotive est le rapport de la puissance disponible au crochet de traction du tender à la puissance indiquée aux cylindres.

Les voies et ouvrages d'art des bonnes lignes de chemin de fer peuvent tolérer une vitesse de 120 kilomètres à l'heure. Un décret du 30 juillet 1853 a autorisé cette allure sur certains points des lignes du Nord-Français, et, à cette date, la vitesse de 120 km était atteinte sur des pentes, malgré l'infériorité des voies de cette époque, qui comportaient des rails en fer de 6 m, pesant 30 kg par mètre. Actuellement, on a adopté des rails de 12 m, pesant 45 kg par mètre ; on a amélioré l'éclissage, les traverses et le balast : on a multiplié les signaux, utilisé le block-system et verrouillé les aiguilles. Par conséquent, des vitesses supérieures à celles admises il y a 47 ans sont possibles. En fait, dans un essai,

(1) MARCHENA, *La traction électrique des chemins de fer* : E. Bernard et Cie, Paris, 1897.

une locomotive Crampton de l'Est-Français, attelée à une seule voiture, a pu atteindre l'allure de 144 kilomètres à l'heure.

Or, dans l'exploitation courante, les vitesses moyennes de marche les plus élevées ont été, en Amérique, 87,2 km, valeur atteinte par l'Empire State Express entre New-York et Buffalo, et, en France, de 82 km entre Paris et Calais.

D'après M. Du Bousquet, ingénieur en chef de la Cie du Nord [1], si l'on ne marche pas partout à 120 km, c'est qu'on ne le peut pas. La locomotive n'a pas actuellement la puissance nécessaire pour remorquer à cette vitesse, ailleurs que dans les pentes, les charges qu'on lui donne à trainer. Pour descendre une pente de 5 mm par m, avec un train de 150 à 180 tonnes, à la vitesse de 120 km à l'heure, il faut faire rendre à la locomotive sa puissance maxima.

Si l'on cherche les raisons de cette insuffisance de la locomotive à vapeur, on arrive aux conclusions suivantes :

1° Son rendement mécanique est faible, ce qui tient surtout à ce que la résistance au roulement de la machine est élevée. Cette résistance, qui est de 12 kg par tonne en palier à 80 km atteint 18 kg par tonne à 100 km.

2° L'effet utile de la vapeur est limité par suite de ce que la vitesse du moteur est liée à celle du train. Il en résulte que, dans les rampes, on doit marcher à forte admission pour faire produire à la locomotive toute sa puissance ; la conséquence est une mauvaise utilisation de la vapeur et partant du combustible brûlé. D'après les expériences de M. Desdouits [2], l'effet utile de la vapeur, qui est maximum dans les locomotives au voisinage d'une admission de 0,2, décroît rapidement aux grandes vitesses quand le degré d'admission augmente.

3° Par suite de l'impossibilité de renforcer suffisamment le couple moteur à la mise en train, les démarrages qui suivent les arrêts et les ralentissements aux endroits dangereux sont lents, ce qui occasionne une réduction sensible de la vitesse moyenne de marche. L'adhérence fait souvent défaut au démarrage par suite de l'insuffi-

(1) *Mémoires de la Société des Ingénieurs civils;* 1894, p. 20.

(2) *Revue générale des chemins de fer;* Mai 1890.

sance du poids porté par les roues motrices. C'est ainsi que les locomotives compound du Nord-Français, pesant 83 tonnes avec leur approvisionnement, n'ont que 30 tonnes de poids sur les essieux moteurs.

4° La puissance des locomotives est limitée par la chaudière qu'il n'est pas possible d'augmenter beaucoup sans compromettre la souplesse du véhicule. En effet, si une partie du poids de la chaudière peut être portée par un bogie, la plus grande partie doit appuyer sur les roues motrices qui n'ont pas la souplesse des bogies et qui possèdent une résistance au roulement plus élevée par suite de l'accouplement.

La nécessité, dans les locomotives express, d'élever la chaudière sur de grandes roues diminue d'ailleurs la stabilité de la machine.

5° Ajoutons que les déplacements alternatifs des organes de la locomotive à vapeur produisent des mouvements de galop, de roulis et de lacet, qui incommodent les voyageurs, fatiguent les voies et accroissent la résistance des trains.

L'obligation de nettoyer fréquemment le mécanisme des locomotives, exposé aux poussières de la voie, limite le service annuel de ces machines à une valeur qui ne dépasse pas 40 000 km.

Solutions possibles par l'électricité. Locomotives à prise de courant. Service par voitures automotrices. — L'utilisation de l'énergie électrique pour la propulsion des trains a été proposée sous des formes diverses, en vue de remédier aux inconvénients signalés.

Les solutions comportent soit des locomotives électriques recevant, par des conducteurs et des prises de courant, l'énergie électrique engendrée dans des usines fixes, soit des locomotives indépendantes portant leurs générateurs d'électricité.

Les locomotives électriques à prise de courant sont une extension des tramways électriques à contact mobile, qui se sont répandus d'une manière si rapide dans ces dernières années. A la suite du grand succès des tramways électriques urbains, les lignes de chemin de fer suburbaines à trafic intense, sur lesquelles il est avantageux d'organiser un service de trains légers se succédant à intervalles rapprochés, ont adopté ce système. Il y a aux États-Unis une série de lignes secondaires équipées de cette manière.

Il existe une ligne, entre Buffalo et Niagara Falls, de 37 km, qui emprunte son énergie à l'usine électrique du Niagara et sur laquelle circulent des voitures automobiles à la vitesse de 55 km à l'heure.

Le réseau de Lawrence, Lowell et Hawerhill possède 90 km de voies électriques alimentées par une usine de 500 chevaux développant des courants triphasés à 5 500 volts. Des transformateurs statiques et des commutatrices, situés dans deux sous-stations, produisent des courants continus à 600 volts pour le fil de trolley.

La traction électrique par prise de courant a également été utilisée sur des chemins de fer métropolitains et dans des tunnels, pour éviter les fumées qui rendent l'atmosphère des tunnels délétère et empêchent la vue des signaux, ainsi que pour accélérer la vitesse moyenne des trains grâce à la puissance de démarrage des moteurs électriques. Lorsque les trains à remorquer sont de grand tonnage, l'on a employé, dans ce cas, des locomotives portant uniquement les moteurs, les appareils de prise de courant et de réglage, ainsi que la pompe à air du frein.

Pour montrer combien la vitesse moyenne de marche peut être accrue par les démarrages rapides des moteurs électriques, considérons une locomotive à vapeur, du type employé au Métropolitain de Berlin, remorquant 9 voitures à deux essieux. La machine, d'une puissance nominale de 400 chevaux, donne une accélération de 0,15 m par seconde. Il faut 80 secondes pour que la vitesse de 12 m par seconde soit atteinte et le parcours en ce laps de temps n'est que de 500 m.

Si l'on suppose un train de 8 voitures électriques automotrices, commandées chacune par 2 moteurs capables de développer ensemble 350 chevaux, la puissance disponible est de 2 800 chevaux, ce qui fait qu'on peut démarrer aisément, quel que soit le nombre de voitures, avec une accélération de 0,455 m par seconde. Par suite, ce train prendrait la vitesse de 12 m en 26,4 secondes. Avec la même vitesse maxima, les deux trains comparés parcourront donc des distances très inégales dans le même temps.

Sur les lignes métropolitaines à haltes rapprochées, les locomotives à vapeur n'atteignent ordinairement leur vitesse maxima qu'au voisinage des arrêts, et si l'on ne faisait pas agir les freins, elles pourraient parcourir en palier plus de 2 kilomètres grâce à la force vive du train. Cette force vive doit être absorbée en pure perte.

Avec la traction électrique, on peut donner rapidement au train une vitesse élevée, puis interrompre le courant et ne faire agir les freins qu'au voisinage de l'arrêt, comme l'indique la fig. 71, ce qui permet de réduire dans une forte proportion les pertes dues au freinage, ainsi que l'usure des bandages, des sabots et des rails.

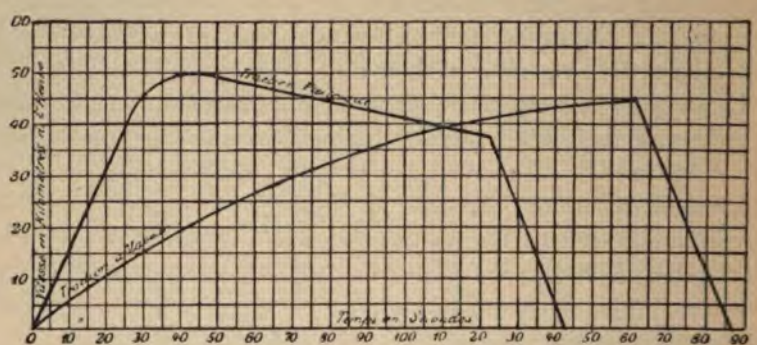

Fig. 83.

La traction électrique pourrait être étendue à tous les chemins de fer d'un pays à la condition d'installer, en des points convenablement écartés, des usines développant de l'énergie électrique à haute tension qui serait transformée dans des sous-stations échelonnées le long des voies et contenant des transformateurs amenant l'électricité à une tension convenable pour actionner les moteurs des trains.

La traction électrique permettrait, dans certains pays, d'utiliser des forces hydrauliques ou de disposer les usines au siége des houillères, où l'on peut obtenir la force motrice dans des conditions exceptionnelles de bon marché.

Les locomotives électriques à prise de courant présenteraient de grands avantages sur les locomotives à vapeur. Le poids des premières pourrait être réduit à la valeur nécessitée pour assurer l'adhérence et l'absence de chaudière permettrait d'amener le centre de gravité beaucoup plus bas que dans les locomotives à vapeur. L'allègement des locomotives et la puissance indéfinie que l'on peut donner aux moteurs électriques conduiraient à des vitesses exceptionnelles.

Le mécanicien d'une locomotive électrique peut consacrer toute son attention à la surveillance de la voie et la sécurité est ainsi augmentée. Enfin, la traction électrique par prise de courant permet de réaliser simplement un système de block automatique d'une efficacité assurée. Il est facile, en effet, d'imaginer un mécanisme permettant à un train de couper le courant au train qui le suit aussi longtemps qu'il n'a pas lui-même dépassé une section déterminée.

L'interdiction des voies ferrées à l'accès du public rend possible l'emploi de conducteurs économiques traversés par des courants de tension élevée. Dans ces conditions, la combinaison de dynamos à grand rendement et de machines fixes à multiple expansion et à condensation n'exigerait pas une consommation de combustible sensiblement plus grande que la traction par la vapeur; le charbon brûlé dans des chaudières fixes peut, d'ailleurs, être d'un prix très inférieur à celui du combustible que nécessitent les locomotives.

Au lieu de donner lieu, comme les locomotives à vapeur, à des mouvements alternatifs qui provoquent des effets perturbateurs et accroissent le coefficient de traction, les locomotives électriques exercent un couple constant, éminemment favorable aux grandes vitesses. Grâce à l'emploi des bogies, le coefficient de traction d'une locomotive électrique descend à 7,5 kg par tonne, alors que ce coefficient atteint 11,5 kg par tonne dans les locomotives à vapeur avec régulateur ouvert et 14 kg avec régulateur fermé, lorsque l'air est comprimé dans les cylindres.

Mais l'avantage essentiel de la locomotive électrique est l'indépendance de la vitesse du train et de celle des machines génératrices, vitesses qui sont liées dans la locomotive à vapeur, ce qui empêche celle-ci de développer des efforts de démarrage sensiblement supérieurs à l'effort normal. Les locomotives électriques exercent dans les démarrages et les rampes des efforts puissants, rendus possibles par leur adhérence totale et qui permettent d'élever notablement la vitesse moyenne des trains.

Les services accessoires, tels que l'éclairage, le chauffage et le freinage des trains, pourraient être assurés par la source électrique qui alimente les moteurs.

Matériel des réseaux suburbains et métropolitains électriques. — *Voitures. Trucs.* Les lignes suburbaines et métropolitaines comportent des longueurs relativement faibles, des vitesses de 30 à 60 km à l'heure et un trafic de marchandises peu important.

L'expérience a montré que, dans ces applications, les meilleurs résultats sont obtenus par l'extension du système en usage dans les tramways urbains, c'est à dire par l'emploi de grandes voitures automobiles avec moteurs sous le truc et remorquant au besoin quelques voitures ordinaires. Le plus souvent, il y a, à l'avant de l'automobile, une cabine pour le mécanicien et les appareils de réglage. Viennent ensuite des compartiments à voyageurs à couloir central, avec portes latérales pour accélérer la descente et la montée. L'arrière du véhicule sert, dans certains cas, de fourgon à bagages.

Par cette disposition, on utilise, aussi bien que possible, le poids utile pour l'adhérence, ce qui, avec des moteurs puissants, permet des démarrages rapides et des vitesses moyennes élevées. Dans les locomotives électriques proprement dites, on est souvent obligé, pour obtenir une adhérence suffisante, de surcharger le truc moteur par du lest formé de taques en fonte.

Les trucs rigides à 2 essieux, ayant un empattement n'excédant pas 1,80 m à 2,50 m afin de passer dans les courbes de faible rayon, provoquent des mouvements de tangage assez accusés; aussi préfère-t-on les trucs à bogies qui sont beaucoup plus souples, plus stables et présentent une moindre résistance au roulement. Les bogies, sur lesquels les caisses des voitures portent par des pivots, comprennent chacun un petit chariot à 2 essieux. En écartant convenablement les deux bogies, on peut faire passer de longues voitures dans des courbes de faible rayon.

Si l'on veut donner à la voiture l'adhérence maxima, il faut rendre tous les essieux moteurs, ce qui, avec les trucs à 2 bogies, exige 4 moteurs. Pour éviter la complication des connexions électriques qui en résulterait, on ne met qu'un moteur par bogie, en disposant l'articulation plus près de l'essieu moteur que de l'essieu porteur, ce qui charge le premier d'une plus grande partie du poids de manière à assurer l'adhérence. Il faut soigner tout spécialement la suspension élastique du moteur sur le truc pour réduire le martelage aux inégalités de la voie.

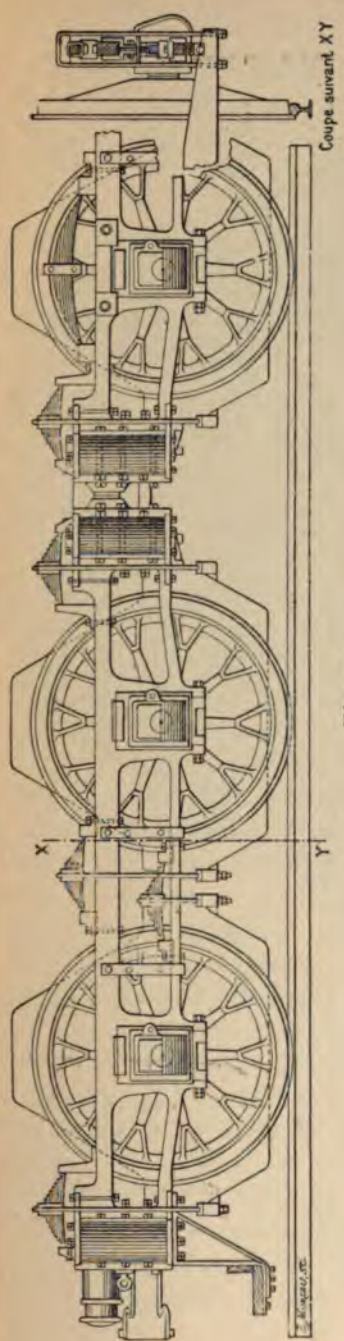

Fig. 72.

Comme dans les voitures de tramway, il y a un triple intermédiaire élastique entre les moteurs et les caisses des voitures. Les moteurs portent sur les essieux par l'intermédiaire de ressorts, les trucs reposent également sur les essieux par des ressorts qu'on choisit assez durs pour limiter les déplacements relatifs, enfin les caisses appuyent sur les trucs par des ressorts à bande très élastiques. Ainsi l'on arrive à empêcher les vibrations des moteurs de gêner les voyageurs.

Les grandes locomotives électriques, employées pour remorquer les trains dans les tunnels et sur les chemins de fer métropolitains, peuvent également reposer sur des trucs à bogies, ce qui leur donne une résistance au roulement très réduite. La fig. 72 représente une partie du truc à 2 bogies de la locomotive de 90 tonnes du tunnel de Baltimore. Les 2 bogies à 2 essieux sont reliés par une articulation qui permet le passage dans des courbes de faible rayon. Le diamètre des roues est de 1,575 m, l'empattement des roues d'un bogie de 2,08 m, la longueur totale de 13 m. Chaque essieu porte un moteur dont on verra la description ci-après.

Moteurs. Les moteurs des lignes secondaires et des lignes métropolitaines attaquent les essieux soit directement, soit par un

201126

pignon denté et une roue d'engrenage. Le premier système, qui a été appliqué d'abord, conduit à des moteurs lourds et coûteux ; ils ne convient que pour des locomotives à grande vitesse et pour des locomotives à marchandises où les efforts doivent être exceptionnellement élevés.

Voici quelques données relatives aux moteurs construits par la General Electric C°.

Type du moteur.	Puissance nominale en chevaux.	Poids en kg avec engrenage.	Effort à la jante des roues en kg.	Couple util en kgm.
GE 1 000	35	1 000	450	47
1 200	40	1 350	540	68
2 000	115	1 950	900	125
2 500	150	»	1 125	189

Les firmes Baldwin et Westinghouse ont également étudié une série de types de voitures à attaque par engrenages.

La General Electric C° a dû étudier pour le tunnel de Baltimore une locomotive d'une puissance considérable, capable de remorquer les trains de marchandises les plus lourds. Elle a employé, dans ce cas, des moteurs à attaque directe hexapolaires, fig. 73, pouvant absorber 900 ampères sous 300 volts et développer 360 chevaux. Ces moteurs sont combinés de manière à posséder un rendement de 90 pour 100 en pleine charge, de 93 pour 100 à demi-charge et de 90 pour 100 à quart de charge. Les bobines inductrices sont enfermées dans une caisse en fer boulonnée sur le bâti des moteurs. L'induit porte un enroulement à tambour, formé de bobines enroulées sur calibre et fixées dans des rainures longitudinales, où elles sont maintenues par des cales en bois. L'induit et le collecteur sont montés sur un arbre creux que l'essieu traverse en laissant un jeu de 6 cm, ce qui permet au truc d'osciller librement. La commande s'opère par un croisillon à 5 branches, calé sur l'arbre creux de l'induit et portant, à l'extrémité de ses bras, des projections en acier trempé, qui viennent se loger entre les rayons des roues, avec intercalation d'une double bande de caoutchouc pour éviter les chocs au démarrage et permettre au moteur de tourner excentriquement par rapport au centre des roues. Les moteurs sont supportés, entre les brancards des trucs, par des ressorts à lames.

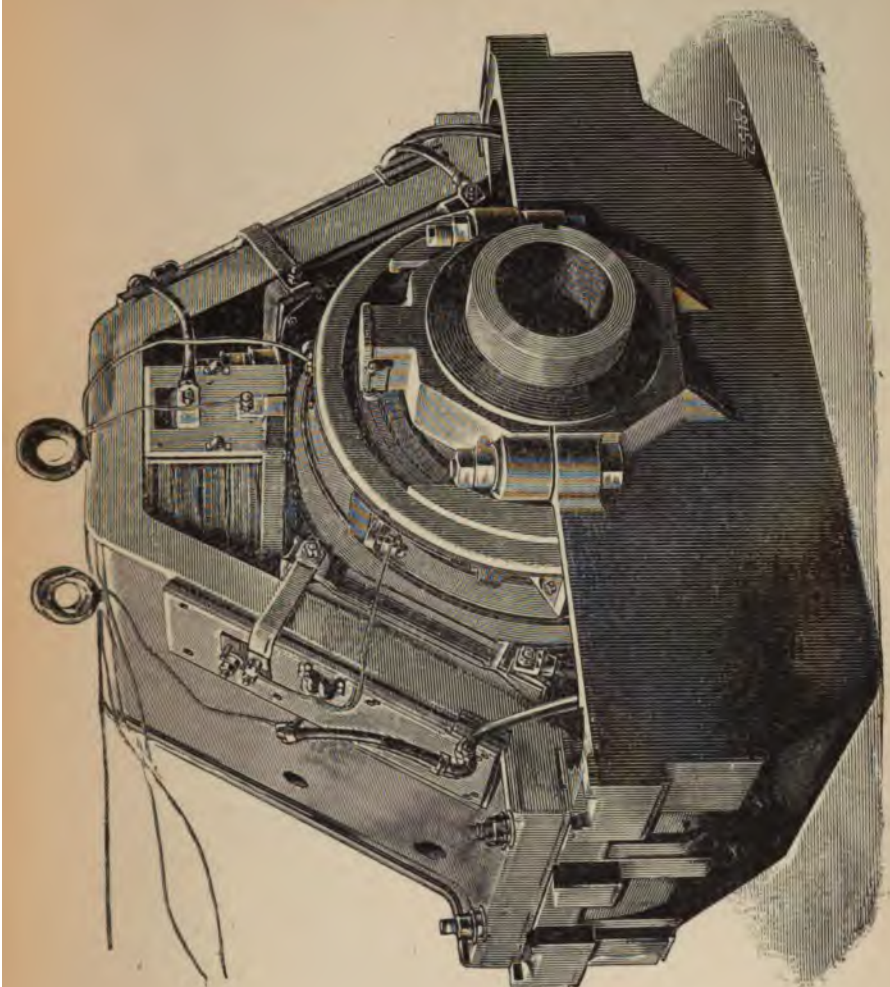

Fig. 73.

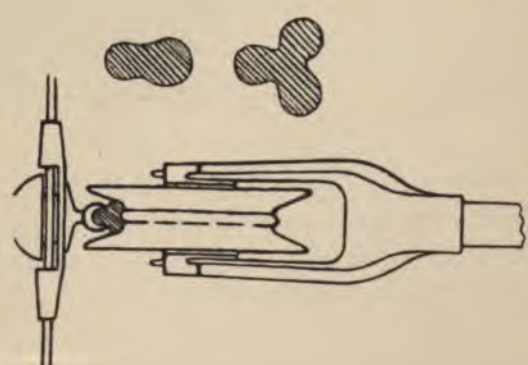

Fig. 74

Prises de courant. Lorsqu'on a conservé le trolley comme prise de courant aérienne dans les lignes de chemin de fer, on a été obligé, en raison de l'intensité des courants, d'adopter des conducteurs ayant jusque 170 mm², auxquels on a donné une des

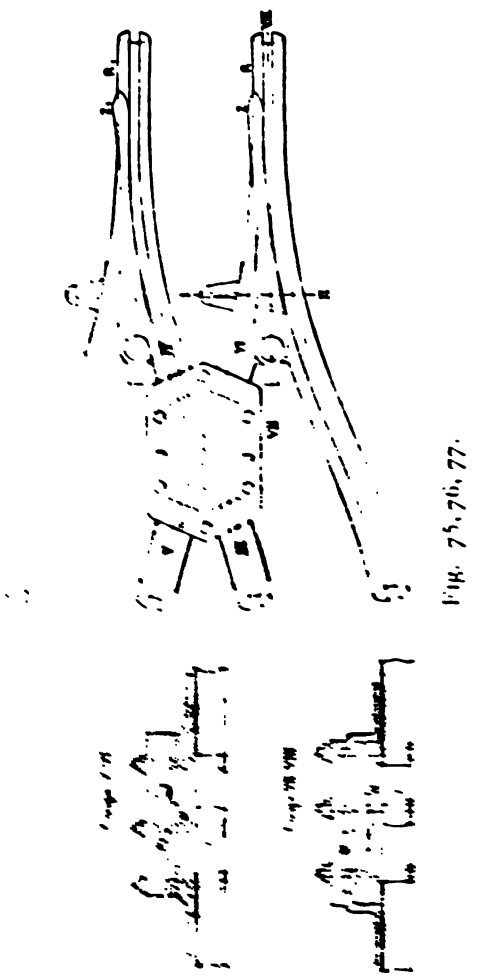

Fig. 75, 76, 77.

[illegible]

Avec les locomotives électriques qui absorbent des courants très intenses, il faut des frotteurs à surfaces étendues. On pourrait

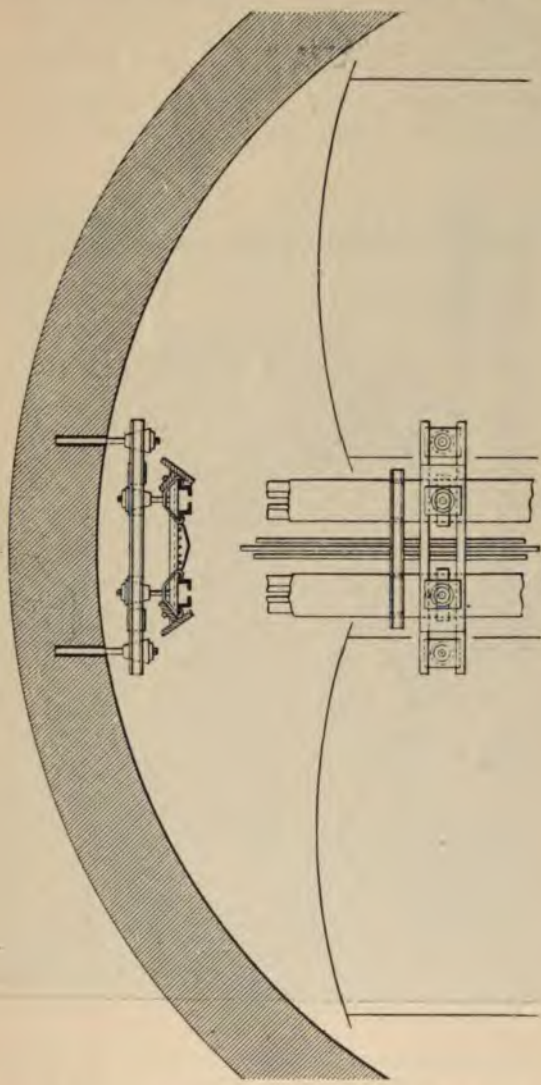

Fig. 78.

reprendre à cette occasion les conducteurs tubulaires fendus utilisés, par la Maison Siemens, à l'origine de la traction des tramways, fig. 75, 76 et 77. Ces tubes étaient maintenus hori-

zontalement par des fils d'acier formant chainette et soutenant les tubes au moyen de fils verticaux rapprochés. Dans le conducteur tubulaire glissait une série de navettes servant à la prise du courant et raccordées entr'elles et au véhicule par un câble souple. Les figures montrent la disposition employée dans les évitements.

Fig. 79.

Une prise de courant, basée sur le même principe et représentée en plan et en élévation dans la figure 78, est employée pour les locomotives de 90 tonnes du tunnel de Baltimore, qui absorbent chacune un courant dont l'intensité atteint 3 000 ampères.

Les conducteurs, suspendus à la voûte du tunnel, consistent en deux pièces de fer en forme de Z, rivées à une plaque de fer. Les tronçons de 9 mètres de longueur pèsent 45 kg au mètre. On les supporte, à des intervalles de 4,5 m, par des tiges de fer entourées de cônes isolants et suspendues à des traverses. Celles-ci sont soutenues par deux tiges ancrées dans la voûte et isolées également par des cônes.

Dans les chenaux formés par les conducteurs glisse une navette fixée, au sommet de la locomotive, par un parallélogramme articulé. La fig. 79 montre l'ensemble de la locomotive, du conducteur et de la prise de courant, dans une partie aérienne de la voie de Baltimore.

Dans les chemins de fer où les voies sont hors d'accès du public, il est souvent possible de loger le conducteur d'amenée du courant sur le sol entre les rails. C'est la disposition employée par M. Hopkinson entre Bessbrook et Newry, en Angleterre, pour une petite ligne vicinale de 5 km environ.

Le circuit est formé par les rails et par un conducteur central en acier posé sur des tasseaux en bois imprégné à chaud de paraffine. Ces tasseaux sont fixés sur les traverses de la voie. L'acier du conducteur renferme 0,09 pour 100 de carbone, 0,02 pour 100 de silicium et 0,63 pour 100 de manganèse ; sa résistibilité est de 12,1 microhms-cm. A conductibilité égale, il coûte les deux tiers du cuivre et présente l'avantage de ne pas tenter les voleurs.

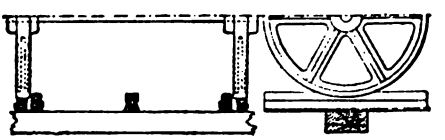

Fig. 80.

La conductance aux éclissages des rails et du conducteur central est assurée par de petits raccords flexibles en cuivre. La résistance d'isolement de la voie est de 600 ohms par kilomètre par les plus mauvais temps, ce qui, à la tension de 250 volts, ne représente qu'une perte de 0,15 cheval par kilomètre.

Ainsi qu'on le voit sur la fig. 80, les roues ont des bandages plats et elles sont guidées par des contre-rails intérieurs. Cette

disposition permet de faire rouler les petits wagons sur les routes ordinaires et elle évite les inconvénients du transbordement des marchandises à l'arrivée. La résistance à la traction de ce système n'est pas plus élevée que celle occasionnée par les roues à boudin.

Les fig. 81 et 82 montrent des conducteurs, également au niveau de la voie, employés dans le Métropolitain aérien de Chicago.

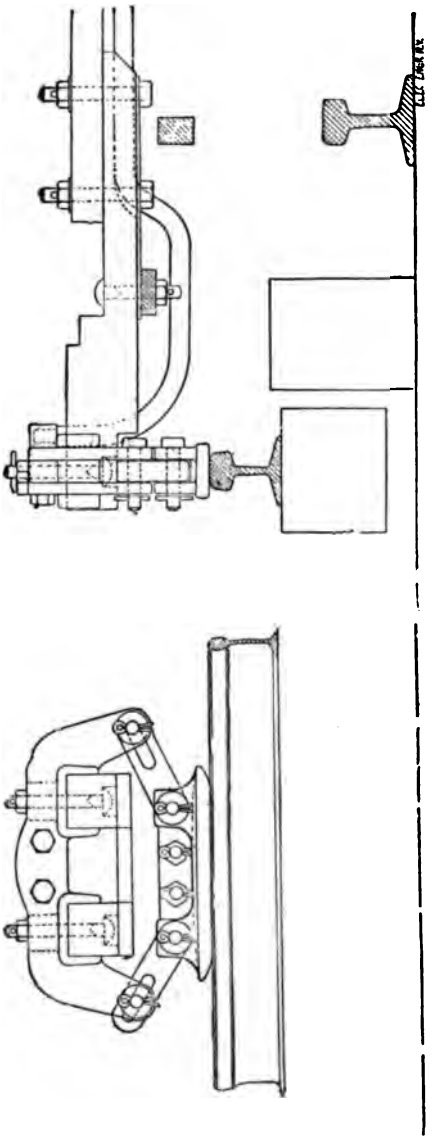

Fig. 82.

Fig. 81.

Les rails de contact en acier pèsent 25 kg au mètre courant et sont disposés, de chaque côté de la voie, à 18 cm environ au dessus des rails de roulement. Ils sont portés de 1,50 m en 1,50 m par

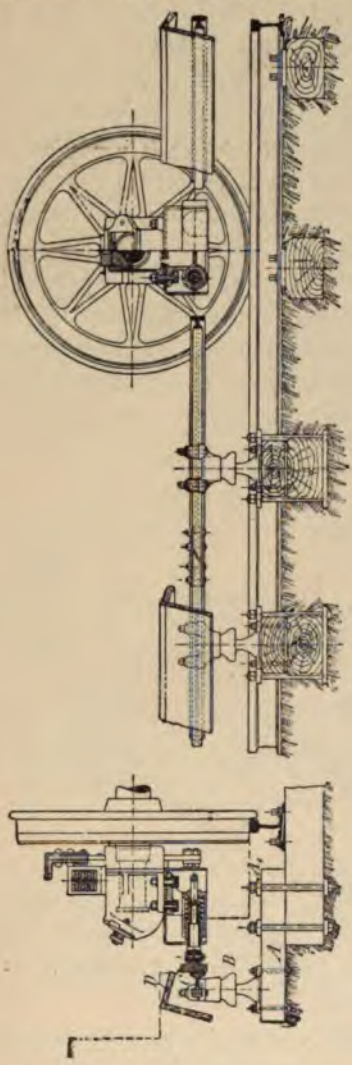

Fig. 83.

des cubes de bois imprégné de paraffine. La conductance aux éclisses est assurée par de larges bandes de cuivre et des rivets en uivre.

Malgré la tension de 500 à 700 volts, la déperdition d'électricité est très minime par le bois. Néanmoins, sur d'autres lignes, on se propose de supporter les rails conducteurs par des isolateurs en porcelaine.

Les voitures automobiles qui circulent sur la ligne recueillent le courant par 4 sabots en fonte, articulés et appuyant par leur poids seulement.

Aux aiguillages, les rails conducteurs sont interrompus, mais, à cause de la longueur des voitures, ils sont toujours touchés par deux sabots au moins.

La ligne de prise de courant proposée par la Société Thomson-Houston pour les voitures automobiles du Métropolitain électrique de Berlin est représentée dans la fig. 83. Elle comporte un rail C, abrité par une toiture D et soutenu par des isolateurs B, portés par des pièces de bois A fixées aux traverses par des ferrures A_1.

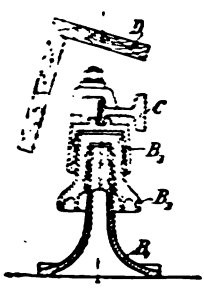

Fig. 84.

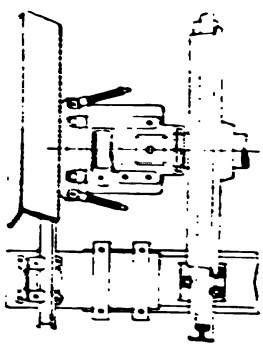

Fig. 85.

Les isolateurs comprennent un pied en fonte, une cloche double en porcelaine et une tête de fonte pour soutenir le rail, fig. 84. Ces diverses parties sont séparées par des couches minces et élastiques de caoutchouc. Les cloches sont écartées de 3 m, de sorte que chaque rail appuie sur 3 isolateurs.

Les bois de support et de protection sont imprégnés.

La surface de frottement est verticale pour empêcher la poussière et la neige de gêner la prise du courant et pour faciliter l'installation de la toiture de protection.

Les fig. 83 et 85 montrent la construction du sabot de contact et sa fixation à la boîte à graisse de la voiture.

Pour les croisements, le rail de prise de courant doit être interrompu. Les voitures portent à l'avant et à l'arrière des sabots de contact de manière à éviter une interruption du courant.

Applications métropolitaines de la traction électrique. — L'application de la traction électrique aux chemins de fer à grande section a débuté sur la ligne souterraine qui relie la Cité de Londres au district suburbain de Stockwell et qui comporte quatre arrêts intermédiaires. Deux voies parallèles sont posées dans deux tunnels distincts creusés à une profondeur minima de 12 m. Ces tunnels jumeaux de 6 km de longueur présentent une section circulaire de 3 m de diamètre et sont revêtus de fonte. On a accès aux gares par des ascenseurs capables de transporter d'un coup 100 personnes, charge maxima d'un train.

Le matériel de traction, étudié par MM. Hopkinson, comprend 14 locomoteurs électriques de 100 chevaux, capables de remorquer 3 wagons à la vitesse de 40 km à l'heure.

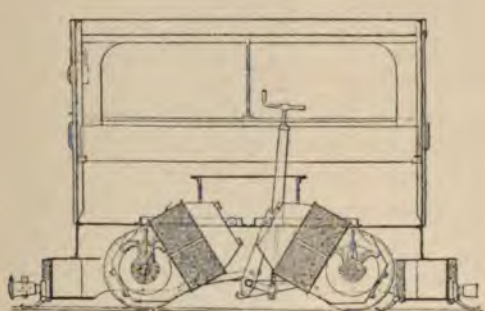

Fig. 86.

Chaque locomoteur, fig. 86, comporte deux électromoteurs en série, de 50 chevaux, dont les armatures ont pour axes les essieux. Ceux-ci sont indépendants et font environ 240 tours par minute.

Le courant est amené de la station génératrice par des feeders isolés et recouverts de plomb, mis en communication de distance en distance avec un conducteur en acier doux placé au milieu de la voie, comme dans la ligne de Bressbrook à Newry. Ce conducteur

est supporté par des isolateurs en verre et n'occasionne qu'une perte égale à 0,01 du courant total, lorsque la tension est de 500 volts. La prise du courant se fait par des sabots en fer reliés, par l'intermédiaire d'un ampèremètre, d'un rhéostat de réglage et d'un appareil de changement de marche, aux électromoteurs. Le retour du courant s'effectue par les rails et le sol.

Les locomotives sont munies d'un frein à main et du frein Westinghouse exigé par les règlements du Board of Trade.

Les trois wagons de chaque train sont à couloir central. Ils ont 2,10 m de hauteur sur 9 m de longueur et sont portés par deux bogies à quatre roues. Dans chaque voiture se trouvent quatre lampes à incandescence reliées en série au conducteur de prise de courant. Un train complet portant 100 personnes pèse une trentaine de tonnes, soit trois fois le poids du locomoteur.

La station génératrice, située au terminus de Stockwell, comporte trois machines compound de 375 chevaux, tournant à 100 tours par minute et pourvues de puissants régulateurs capables de faire varier l'admission de zéro aux trois quarts de la course.

Chaque moteur attaque une dynamo Edison-Hopkinson compound capable de développer 500 volts et 450 ampères. Le rapport entre la puissance électrique des dynamos et la puissance indiquée des moteurs à vapeur dépasse 85 pour 100. Le rapport entre le travail utile des électromoteurs et le travail indiqué des machines serait d'environ 60 pour 100. Les dynamos communiquent avec les feeders par l'intermédiaire de coupe-circuits de sûreté. L'adoption d'électromoteurs avec engrenages à simple réduction de vitesse eût permis une économie de 10 tonnes sur le poids des locomotives.

L'aérage des tunnels est parfait, grâce aux trains qui jouent le rôle de pistons et refoulent l'air vers les gares formant cheminées d'appel.

La General Electric C° a installé la traction électrique sur les lignes métropolitaines qui relient le centre de Chicago aux régions suburbaines et qui auront 30 km de voies. Le chemin de fer aérien est posé sur un viaduc en acier, dont la hauteur au dessus du sol des rues est de 4,60 m en moyenne et qui appuie sur des paliers métalliques distants de 12 à 15 m. Les rails de roulement

pèsent 41 kg au mètre. Les rails de contact, décrits précédemment, sont divisés en sections isolées, reliées séparément à l'usine par 18 feeders formés également de rails disposés, comme les rails de contact, sur des blocs de bois paraffiné. Ces feeders sont placés dans l'entrevoie et sont recouverts de boîtes en bois qui les mettent hors d'atteinte.

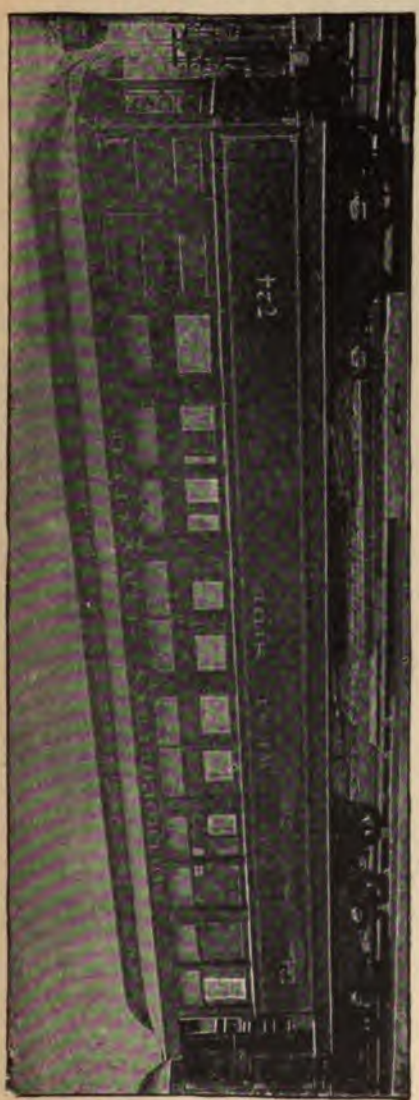

Fig. 87.

Les trains sont formés d'une voiture automobile de 40 places et de 2 voitures ordinaires de 48 places, dont la longueur est uniformément de 14,5 m et la largeur de 2,60 m. Dans la première, fig. 87, une cabine à l'avant est occupée par le conducteur et les appareils de commande.

Les voitures automobiles pèsent 29 tonnes à vide; elles sont montées sur 2 bogies; chacun de ceux-ci a un de ses essieux pourvu d'un moteur de 125 chevaux. On obtient de la sorte un effort total à la jante des roues de 1 800 kg en marche [normale, pouvant imprimer à un train de 80 à 100 tonnes une vitesse moyenne de marche de 45 km à l'heure. Comme il y a un grand

nombre d'arrêts intermédiaires, les démarrages absorbent les deux tiers de l'énergie consommée.

Les courants à 500 volts arrivent à la voiture par des sabots de contact décrits plus haut. Il ne dépassent pas en moyenne 175 ampères par train de 100 tonnes, ce qui correspond à une dépense de 70 watts-heures par tonne-kilomètre.

La cabine d'avant abrite un interrupteur automatique, destiné à couper le courant lorsque celui-ci dépasse une intensité déterminée, ainsi qu'un grand contrôleur permettant de mettre les moteurs en série ou en parallèle avec et sans résistances. La cabine contient également un petit moteur électrique commandant la pompe à air nécessaire pour le frein Westinghouse. Les voitures sont éclairées et chauffées électriquement.

Dans les trains à voitures automobiles en service à Chicago, on a adopté un système de commande dû à Sprague. Chaque voiture est pourvue d'un contrôleur actionné par un servo-moteur électrique et de deux sabots de prise de courant. Les servo-moteurs sont réglés de manière que les contrôleurs soient commandés simultanément par le conducteur posté à l'avant du train et occupent à chaque instant des positions semblables. Pour cela, un câble de connexion spécial longe le train et les connexions sont faites en double, à chaque extrémité des voitures, comme pour les tuyauteries des freins à air comprimé. Au mois de mai 1899, le réseau métropolitain de Chicago comportait 4 génératrices de 2 000 chevaux chacune, 55 voitures automobiles et 130 voitures de remorque.

Voici quelques renseignements généraux concernant la traction sur la voie métropolitaine de Baltimore, dont les moteurs et les prises de courant ont été décrits au paragraphe précédent. Cette voie a été construite, en majeure partie, en tunnel sous la cité, pour éviter les détours que les trains de la ligne de Baltimore et Ohio devaient effectuer autour de la ville. Pour supprimer la fumée dans le tunnel, on s'est décidé à faire pousser par des locomotives électriques les trains avec leurs locomotives à vapeur, sur le parcours urbain de 5 km.

Le problème était de conduire des trains de voyageurs de 500 tonnes à raison de 56 km à l'heure et des trains de marchandises de 1 200 tonnes à raison de 25 km à l'heure, sur des rampes qui atteignent 15 mm par m.

Les locomotives électriques, fig. 88, comportent 2 bogies à 2 essieux munis de roues de 1,57 m de diamètre. Chaque essieu reçoit un moteur pouvant développer 350 chevaux à la vitesse de 120 tours par minute ; momentanément, la puissance peut atteindre 1 000 chevaux. Le chassis porte une cabine abritant le conducteur, l'appareil contrôleur et la pompe à air. Les résistances de démarrage sont sous le plancher. Le poids des moteurs est de 13 tonnes ; le poids total de la locomotive de 87 tonnes.

L'usine possède des machines Reynold-Corliss de 800 chevaux et des dynamos hypercompound capables de fournir 700 volts en charge et 600 volts à vide.

Le courant est conduit par 3 feeders de 650 mm² à la ligne aérienne dont la section est aussi de 650 mm². Le retour du courant se fait par les rails et des feeders de retour.

La Ville de Paris a inauguré en 1900 plusieurs lignes de chemins de fer importantes. Le réseau du *Métropolitain* comporte une ligne de 10,65 km, allant de la Porte de Vincennes à la Porte Maillot, avec 2 embranchements, l'un de 1 700 m vers la Porte Dauphine et l'autre de 1 600 m vers le Trocadéro. Ces lignes sont en tunnel avec revêtement de maçonnerie. L'usine électrique, située au quai de la Rapée, possède 3 groupes de 1 500 kilowatts chacun. Un groupe donne directement 600 volts continus pour les sections voisines de l'usine, tandis que les deux autres produisent des courants triphasés à 5 000 volts amenés à une sous-station établie place de l'Étoile et pourvue de commutatrices.

Le matériel roulant comporte des voitures automobiles à 2 moteurs du système Westinghouse équipées par la Compagnie Générale de Traction.

La Compagnie du chemin de fer d'Orléans a également installé une voie souterraine de 3 700 m entre la gare d'Austerlitz et la gare du quai d'Orsay.

L'énergie électrique est produite à Ivry, sous la tension de 5 500 volts triphasés, par des génératrices de 1 000 kilowatts. Deux sous-

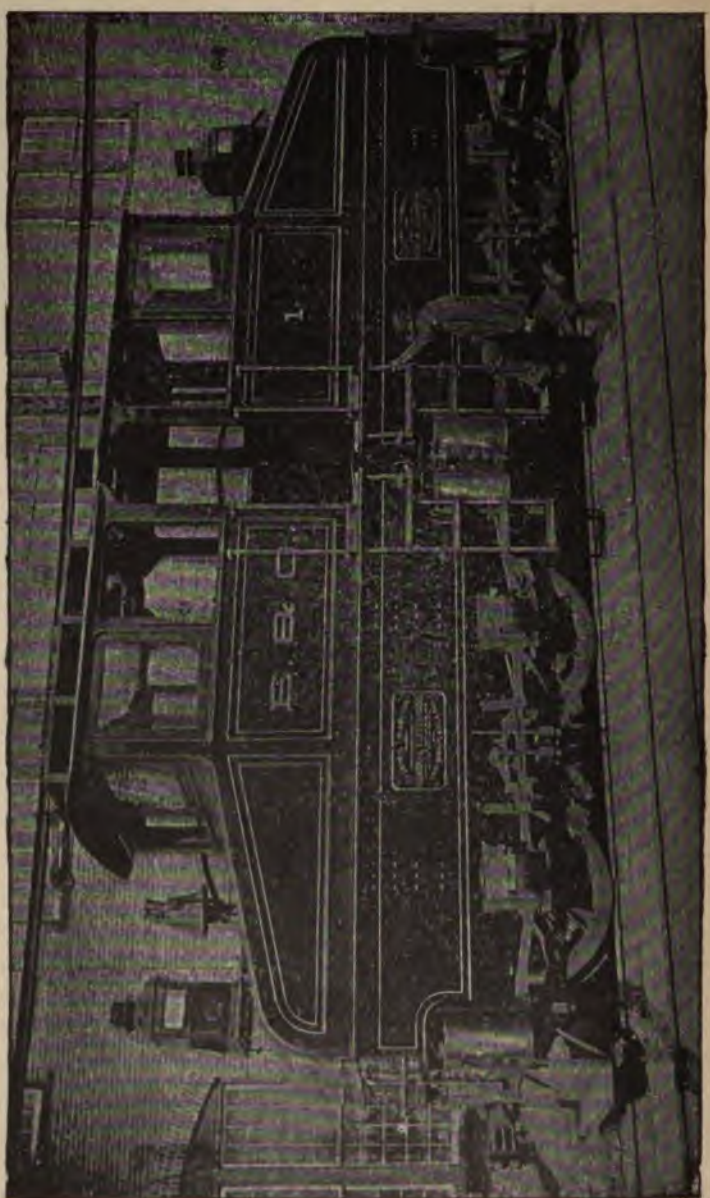

Fig. 88.

stations, situées aux terminus de la ligne, présentent des commutatrices de 250 kilowatts donnant du courant continu à 550 volts.

Les locomotives électriques sont montées sur 2 bogies à 2 essieux et portent 4 moteurs à engrenage capables de développer en tout une puissance de 500 kilowatts.

Chemins de fer électriques interurbains. — Certains pays paraissent spécialement indiqués pour une extension rapide de la traction électrique des chemins de fer. La Belgique, où les villes sont rapprochées et ont entr'elles un trafic intense, est appelée à voir se développer entre les agglomérations un service de trains légers et rapides, se succédant à courts intervalles et établissant entre les grands centres des relations de plus en plus nombreuses.

Quelques usines bien situées au point de vue de l'accès du combustible à bon marché et pourvues de tous les perfectionnements des machines à vapeur actuelles, tels que le surchauffage de la vapeur, l'utilisation du calorique perdu, par le système Josse et Berhend, etc., permettraient de livrer le cheval-heure avec une dépense de moins de 500 grammes de charbon. L'énergie électrique serait transmise, dans un réseau primaire s'étendant sur tout le pays, par des courants alternatifs à haute tension et des stations de transformation convenablement échelonnées livreraient le courant au voltage réduit nécessaire pour les prises de courant.

La Suisse, les régions françaises voisines et la Haute Italie sont également appelées à bénéficier de la traction électrique par l'utilisation des chutes d'eau nombreuses et régulièrement entretenues par les glaciers des Alpes.

Déjà la Suisse a installé plusieurs chemins de fer d'intérêt local qui présentent cette particularité de l'emploi direct des moteurs triphasés sur les voitures, de manière à supprimer la transformation des courants alternatifs en courants continus [1].

---

[1] Pour l'application des moteurs triphasés à la traction, consulter le traité complet de *Traction électrique*, de MM. Blondel et Dubois, 2 vol. grand in-8°; Baudry, Paris.

Voici la description du chemin de fer de Burgdorf à Thun, qui a été ouvert en juillet 1899 et a été entrepris par MM. Brown et Boveri, de Baden. Ce chemin de fer, à voie normale de 1,44 m et de 40 km de longueur, est l'application la plus importante qui existe de la traction par moteurs triphasés. La voie part de la gare centrale de Thun, suit la ligne de l'Emmenthal en traversant trois tunnels, un grand nombre de ponts, des courbes de 250 mètres de rayon et des pentes de 2,5 pour 100, pour arriver à la gare de Burgdorf.

Les rails du type Vignole, de 36 kg par m et de 12 m de longueur, reposent sur des traverses métalliques. Afin d'éviter les connexions des rails qui sont exposées à se briser par les vibrations, on a ménagé entre les éclisses d'une part, le patin et le boudin des rails d'autre part, des rainures qui sont remplies de zinc.

L'usine électrique utilise la chute de Spiez, sur la Kander, et contient 4 groupes de 900 chevaux. La chute est de 63 m et le débit maximum de 10 m³ par seconde. Les alternateurs attaqués directement par les turbines produisent des courants triphasés à 4 000 volts que des transformateurs relevent à 16 000 volts pour l'alimentation de 14 postes de transformateurs de 450 kilowatts, à bain d'huile, destinés à ramener la tension à 750 volts sur les lignes de prise de courant.

Celles-ci comportent 2 fils de 8 mm de diamètre écartés de 1,10 m et portés avec double isolement par des poteaux en bois distants de 35 m au maximum. Les rails servent de troisième conducteur. Les prises de courant sur les conducteurs aériens se font par archets.

La ligne primaire à 16 000 volts ne suit pas toujours la ligne de chemin de fer. Elle est formée de 3 fils de cuivre de 5 mm de diamètre portés par des isolateurs en porcelaine et des poteaux en bois. On utilise des paratonnerres à cornes de Siemens, avec résistance liquide sur le fil de terre pour éviter les courts-circuits.

Le matériel roulant comprend :

[illegible] 2 locomotives électriques, plus spécialement destinées aux trains de marchandises. Chacune d'elles est équipée de 2 moteurs [illegible] chevaux à [illegible] tours par minute et à 750 volts, et

peut remorquer un train de 100 tonnes sur une rampe de 2,5 pour 100 à la vitesse de 18 km à l'heure ou un train de 50 tonnes à 36 km, grâce à 2 réductions par engrenages. Le poids en ordre de service est de 28 tonnes. L'équipement électrique pèse 10 tonnes.

2° 6 voitures automobiles à voyageurs, à bogies, pouvant contenir 68 personnes et munies chacune de 4 moteurs triphasés de 55 chevaux, 586 tours et 750 volts. Poids en ordre de service : 32 tonnes. L'équipement électrique pèse 8,5 tonnes. Les locomotives et les automobiles portent en tête et en queue 2 archets pour conduire le courant aux moteurs. La vitesse de ceux-ci est régularisée par une résistance variable dans le circuit de l'induit. Les véhicules moteurs sont pourvus de petits moteurs triphasés manœuvrant les pompes de compression du frein Westinghouse. Elles peuvent d'ailleurs être attelées à des voitures quelconques du réseau suisse.

De petits transformateurs servent pour produire le courant destiné à l'éclairage et aux appareils de chauffage électrique.

Les essais ont montré qu'un train composé d'une voiture automobile et d'une voiture remorquée consomme 260 ampères sous 760 volts, sur une rampe de 2,5 pour 100 et en alignement droit. Le même train, sur la même rampe, mais en courbe de 250 m de rayon, prend 330 ampères à 850 volts.

La consommation maxima d'une locomotive remorquant un train de 50 tonnes à la vitesse de 36 km ne dépasse pas 300 ampères sous 700 volts.

La Compagnie de l'Ouest a établi entre la gare des Invalides, à Paris, et Versailles, une ligne de 14,6 km présentant des pentes maxima de 1 pour 100 et un tunnel de 3 500 m, dont l'exploitation se fait par l'électricité.

L'usine, située à Issy-les-Moulineaux, comporte des unités de 800 kilowatts développant des courants triphasés à 5 000 volts que des commutatrices, établies dans 3 sous-stations, à Viroflay, à Meudon et au Champ-de-Mars, ramènent à 550 volts continus. La prise de courant se fait par des sabots de contact sur un troisième rail et le retour s'accomplit par les rails de la voie.

Les locomotives, capables de remorquer des trains de 110 tonnes

à 80 km à l'heure, sont portées par 2 bogies à 2 essieux, chaque essieu étant pourvu d'un moteur.

Il est à remarquer que l'on tend à accroître de plus en plus la puissance des unités des usines génératrices. On a vu plus haut que les unités du Métropolitain de Paris sont de 1 500 kilowatts. Celles des lignes de tramways de New-York atteignent 5 000 kilowatts.

On a déjà fait ressortir que l'un des avantages des chemins de fer électriques est la possibilité d'utiliser des moteurs capables de développer pendant le démarrage une puissance très supérieure à la puissance normale. Comme, d'autre part, dans les voitures automobiles, le poids total peut être employé à assurer l'adhérence, on arrive à démarrer en un temps beaucoup plus court qu'avec les autres systèmes de propulsion, ce qui accroît notablement la vitesse moyenne sur les lignes à arrêts fréquents.

Pour calculer le temps du démarrage, il faut tenir compte, d'une part, de l'effort requis par les frottements, les rampes, les courbes et la résistance de l'air, d'autre part, de la force accélératrice.

La résistance due aux frottements, aux rampes et aux courbes peut être représentée, en kg par tonne, par une constante sur une partie de ligne à profil invariable.

La résistance de l'air est proportionnelle au carré de la vitesse d'après la formule de Newton.

Entre les vitesses de 0 à 28 m par seconde (0 à 100 km à l'heure), la résistance du train en palier rectiligne est, en kg par tonne,

$$R = 2 + 0{,}013\, v^2 = a + cv^2$$

lorsque l'avant de la voiture est en biseau.

La force correspondant à une accélération φ est, en kg par tonne, g étant l'accélération de la pesanteur,

$$\frac{1\,000}{g}\varphi = 102\,\varphi.$$

Si donc F est l'effort total développé, supposé invariable (ce qui est le cas lorsque le courant est maintenu constant dans un moteur en série)

$$F = a + cv^2 + 102\,\varphi.$$

Pour assurer l'adhérence, la valeur de F doit être inférieure au $\frac{1}{13}$e du poids porté par les essieux moteurs.

De l'expression précédente l'on déduit, en posant

$$\alpha = \sqrt{\frac{F - a}{c}},$$

pour la durée, t secondes, nécessaire pour atteindre une vitesse V,

$$t = \frac{102}{2c\alpha} \log_e \frac{\alpha + V}{\alpha - V} \quad (1).$$

Soit, par exemple, une voiture de 30 tonnes, possédant 4 moteurs capables de développer pendant la durée du démarrage un effort total aux jantes des roues de 1 800 kg, soit 60 kg par tonne ; on aura,

$$\text{pour} \quad v = 28, \quad a = 2, \quad c = 0{,}013, \quad \alpha = \sqrt{\frac{58}{0{,}013}} = 66{,}8$$

$$t = \frac{102}{2 \times 0{,}013 \times 66{,}8} \log_e \frac{66{,}8 + 28}{66{,}8 - 28} = 52{,}3 \text{ secondes.}$$

---

(1) En effet, $\varphi = \frac{dv}{dt}$; par suite

$$dt = \frac{102\, dv}{F - a - cv^2}$$

et

$$t = 102 \int_0^V \frac{dv}{F - a - cv^2} = \frac{102}{2c\alpha} \log_e \frac{\alpha + V}{\alpha - V}$$

si l'on remplace sous le signe intégral $F - a$ par $c\alpha^2$.

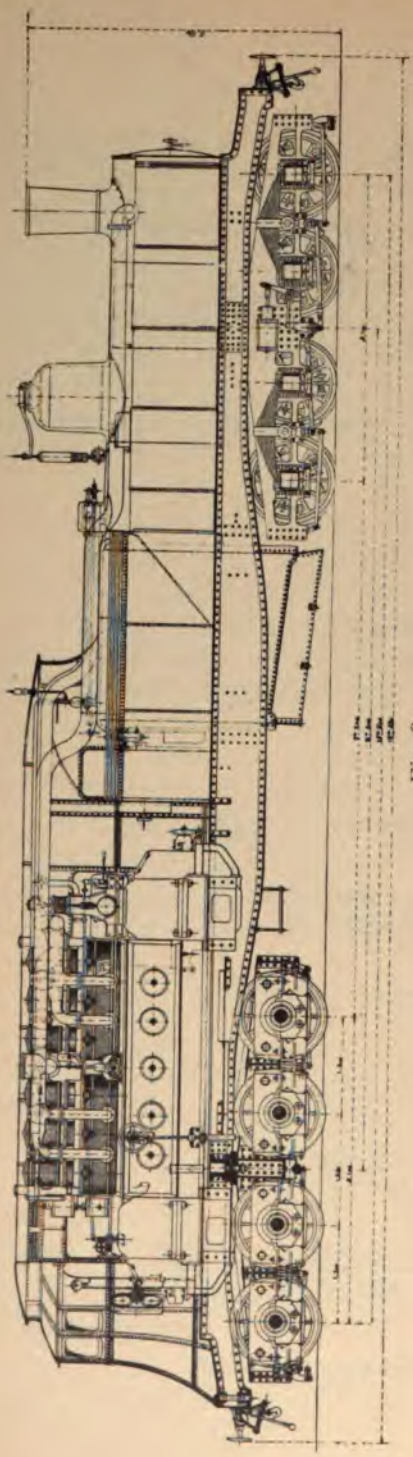

Fig. 89.

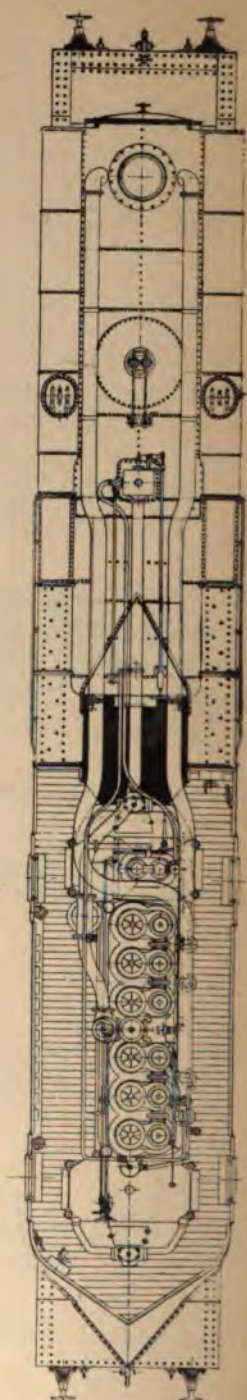

Fig. 90.

Locomotives indépendantes. Système à accumulateurs. Système Heilmann. — Pour éviter les frais considérables occasionnés par la transformation des chemins de fer existants en vue de la traction par prise de courant, on a songé à des solutions transitoires comportant des locomotives munies de leurs générateurs électriques.

Les *locomotives à accumulateurs* qui rentrent dans cette catégorie ne peuvent guère se développer avec les éléments secondaires au plomb. Le poids de ces accumulateurs (150 kg par cheval) rend leur emploi impossible sur les locomotives à grande vitesse.

Reste la *locomotive Heilmann*, qui est une locomotive à vapeur avec transmission électrique entre le moteur thermique et les essieux.

Voici les données fournies par M. Heilmann sur son dernier modèle de locomotive : un truc porté par 2 bogies à 4 essieux, fig. 89 et 90, sert de base à une chaudière de 185 m² de surface de chauffe et à une machine Willans de 1 350 chevaux qui entraîne 2 dynamos génératrices capables de débiter 2 000 ampères à 455 volts.

La machine à vapeur Willans, étudiée spécialement pour cette application par MM. Mazen et Robinson, possède six lignes de cylindres, ce qui supprime complètement les couples perturbateurs et, par suite, les vibrations. L'excitation des génératrices est obtenue par une dynamo indépendante débitant 140 ampères sous 115 volts, pourvue d'un rhéostat de réglage dans son circuit principal et actionnée par une machine Willans à deux lignes de cylindres. Les génératrices alimentent 8 moteurs excités en série et disposés sur les 8 essieux. M. Heilmann est arrivé, par un procédé ingénieux, à supprimer les rhéostats de démarrage dans le circuit des moteurs.

La machine à vapeur principale est à détente fixe et à vitesse variable. On adopte le degré de détente qui correspond à la meilleure utilisation de la vapeur. Le couple moyen développé par le moteur à vapeur, qui est égal au travail par tour divisé par 2π, est donc invariable. Il est, à chaque instant, équilibré par le couple résistant des génératrices, lequel est proportionnel au produit du flux inducteur par le courant induit. On peut donc régler ce dernier en faisant varier le flux inducteur, c'est à dire le courant de la machine excitatrice. Par là, on modifie à volonté le couple des moteurs électriques, qui est une fonction de l'intensité du courant

qui les traverse. La vitesse du moteur à vapeur dépend de la puissance qu'on demande à celui-ci : si la locomotive gravit une rampe, les moteurs disposés sur les essieux ralentissent, leur force contre-électromotrice diminue, le courant augmente et atteint une valeur qui, pour une excitation donnée des génératrices, détermine la vitesse de celles-ci. Si l'on augmente l'excitation, la vitesse diminue et inversement. Dans les rampes, on fait produire à la machine à vapeur la plus grande puissance possible, c'est à dire qu'on règle l'excitation de manière à lui donner la vitesse maxima. Le régulateur du moteur à vapeur n'a d'autre fonction que d'empêcher celui-ci de dépasser une vitesse limite.

Le couple de la machine à vapeur n'est pas tout à fait constant parce que la chute de pression de la vapeur croît avec la vitesse. De même, le couple antagoniste des génératrices, pour une excitation et un courant donnés, augmente un peu avec la vitesse par suite de l'accroissement des pertes dans le noyau de l'armature. Cependant, entre 270 et 400 tours, les variations ne dépassent pas 10 pour 100.

Cette combinaison réduit au minimum les manœuvres à faire pour la conduite du train, puisque tout le réglage de la locomotive se fait par le rhéostat d'excitation, et elle assure une marche économique, puisque la détente la plus favorable est sensiblement la même à toutes les vitesses.

M. Heilmann avait essayé dans le principe les courants triphasés, afin de supprimer les collecteurs des moteurs, mais il a dû y renoncer, parce qu'il était obligé de régler la vitesse de la machine à vapeur d'après celle des moteurs. Les courants continus assurent, au contraire, l'indépendance de la machine à vapeur qu'on peut toujours faire fonctionner dans les meilleures conditions d'utilisation de la vapeur. La tension relativement forte de 500 volts a été adoptée en vue de diminuer les courants et, partant, d'améliorer le service des collecteurs et de faciliter l'emploi des machines électriques.

D'après M. Dwan, le poids de la locomotive avec son com-

[illegible]

bustible et le poids moyen de la réserve d'eau s'élèvent à 132 tonnes. Les pertes dans la machine à vapeur, les dynamos génératrices et réceptrices et les câbles sont voisines de 25 pour 100 en pleine charge et ne varient pas sensiblement aux allures moyennes du train. Il en résulte qu'avec une puissance indiquée de 1 350 chevaux environ on peut compter sur une puissance de 1 000 chevaux à la jante des roues motrices.

Les expériences faites, sur la ligne de l'Ouest-Français, avec la locomotive Heilmann ont montré que la résistance au roulement de ce véhicule ne dépasse pas celle des voitures ordinaires.

Les calculs de M. Drouin établissent que la locomotive électrique peut, à 100 km à l'heure en palier, développer au crochet de traction 650 chevaux et remorquer 253 tonnes de matériel de train ordinaire avec un rendement mécanique de 47 pour 100. Cette puissance est supérieure à celle des locomotives à vapeur à grande vitesse. Elle peut être renforcée aisément. En effet, comme les dimensions de la chaudière ne sont pas limitées par de grandes roues motrices, comme dans les locomotives à vapeur, il n'y aurait aucune difficulté à étudier un type capable de produire 2 000 chevaux indiqués.

Locomotives pour mines, usines et chantiers. — Les mines et usines demandent des locomotives capables de tirer des rames de wagons ou wagonnets à des vitesses qui n'excèdent généralement pas 5 à 10 km à l'heure, ce qui conduit à employer une transmission par chaîne, par vis sans fin ou par engrenage double. Ordinairement, on n'utilise qu'un moteur qui attaque les deux essieux par chaînes ou par roues dentées, à moins qu'on ne couple ces essieux par des bielles. Il est nécessaire de rendre les deux essieux moteurs pour obtenir l'adhérence totale et éviter le patinage que la boue et la graisse occasionnent souvent sur les voies industrielles. Au besoin, le tracteur peut être surchargé par des saumons de fonte.

Dans les mines où les galeries sont basses, il faut faire usage de locomotives surbaissées.

Le moteur se place soit sous le truc, comme dans les tramways, soit plus souvent, à cause de la petitesse des roues, au dessus du truc. D'habitude, le moteur est fixé rigidement au châssis et l'on

donne de l'élasticité à la transmission par l'emploi de chaines ou, dans le cas d'un double engrenage, en articulant l'arbre intermédiaire sur l'arbre du moteur, qui porte les paliers.

Les moteurs doivent être étanches, particulièrement dans les mines grisouteuses où les accumulateurs sont indispensables pour éviter les prises de courant. Dans ce cas, les éléments secondaires peuvent constituer le lest du tracteur. M. Libert a recommandé d'incliner les galeries de mines dans le sens de la descente des charges de manière à rendre l'effort à la descente égal à l'effort à la remonte.

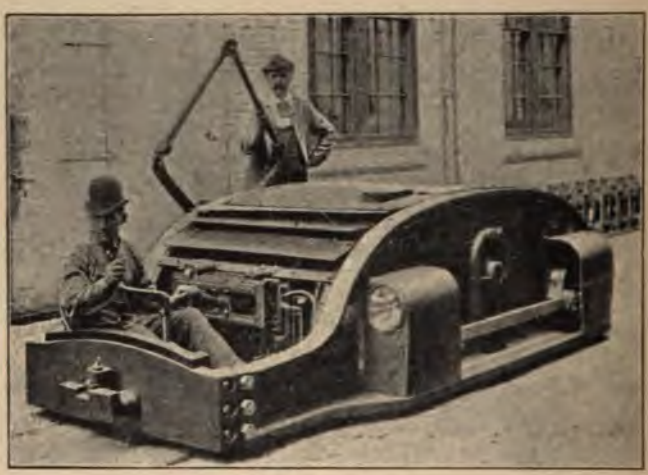

Fig. 91.

Dans les mines non grisouteuses, on utilise les prises de courant, qui sont ordinairement à 2 fils pour éviter le danger que peut offrir, avec le retour par les rails, le contact simultané de ceux-ci et du fil d'amenée du courant. La tension dans les galeries basses ne doit pas excéder 500 volts continus ou 250 volts alternatifs.

Les manœuvres doivent ordinairement se faire dans les deux sens pour éviter les plaques tournantes.

Les fig. 91 et 92 représentent deux types de locomotives de mines étudiés par la Cie Thomson-Houston. Leur bâti est constitué par deux longerons en fonte assemblés par deux traverses et reposant, par le moyen de ressorts à boudin, sur les boites à graisse.

Le modèle de la fig. 91 peut développer un effort de traction de

2 200 kg et pèse 10 tonnes. Il mesure 3,75 m de longueur sur 1,85 m de largeur et 1 m de hauteur. L'appareil de prise de courant, consistant en une roulette portée par le sommet d'un parallélogramme articulé, qui tend à se redresser sous l'action de ressorts, permet la marche en avant et en arrière,

L'autre modèle, de dimensions plus restreintes ($3^m,45 \times 1^m,45 \times 0^m,86$), pèse 4,08 tonnes et procure un effort de traction de 680 kg.

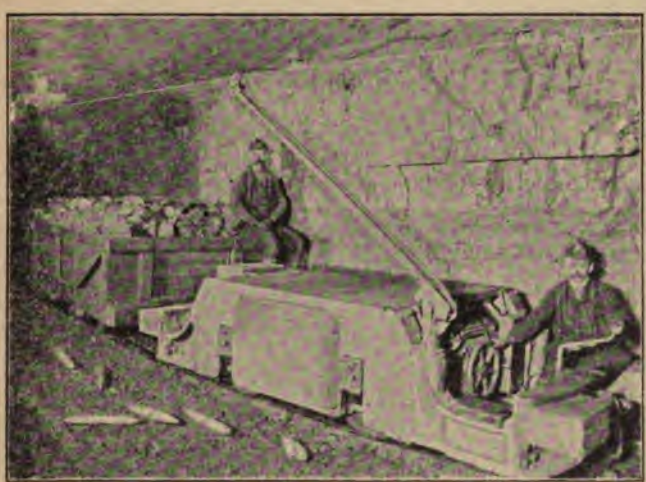

Fig. 92.

Les locomotives électriques de mines ont l'avantage de réaliser une sérieuse économie sur la traction par cheval. Elles n'échauffent ni ne vicient l'air et n'offrent pas les dangers d'incendie et d'explosion des locomotives à vapeur. Enfin, elles permettent la concentration de la production de la puissance motrice dans une usine génératrice unique, capable de pourvoir à l'éclairage et aux autres services de la mine qui exigent de la force motrice.

Les lignes électriques posées dans les chantiers pour le transport des matériaux doivent être déplacées au fur et à mesure de l'avancement des travaux. Pour faciliter ce déplacement, on soutient le fil de trolley par de grands cadres métalliques dont le côté inférieur sert de traverse pour les rails.

[redacted]

lon
lan
lie

[illegible]

[illegible]

[illegible]

[illegible]

[illegible]

Report :	fr.	0,6561
Solde des palefreniers	»	0,2720
Solde des relayeurs et côtiers, employés divers	»	0,2333
Achat d'eau	»	0,0130
Nourriture des chevaux	»	2,4092
Renouvellement des chevaux	»	0,4439
Ferrage des chevaux	»	0,1167
Chevaux au labour	»	0,0567
Entretien du mobilier des dépôts	»	0,0367
	fr.	4,2376
D'où il faut déduire la recette des fumiers	»	0,0970
Reste, par journée de cheval :	fr.	4,1406

Pendant l'exercice 1883, le parcours quotidien d'une voiture de tramway a été de 94,206 km et le nombre moyen de chevaux par voiture 13,95, y compris les chevaux d'infirmerie, de labour, de corvée et d'inspection. Le prix par voiture-kilomètre est donc

$$\frac{4,1406 \times 13,95}{94,206} = 0,613 \text{ fr.}$$

Il convient d'ajouter à cette somme les intérêts à 6 % du capital chevaux, harnais, fourrage, soit par voiture-kilomètre 0,031 : ce qui donne en tout 0,644 fr.

En répétant ces divers relevés pour 4 exercices, pendant lesquels il n'y a eu ni épidémie de chevaux, ni disette de fourrage, M. Gadot est arrivé à la moyenne de 0,561 fr. par voiture-kilomètre pour le pris de la traction animale, en comptant, comme on l'a vu, exclusivement les frais de traction.

Sur une ligne Bruxelloise, les dépenses occasionnées par les chevaux se répartissent de la manière suivante par journée de cheval, le type de voiture employé contenant 30 personnes :

Nourriture	fr.	1,950
Personnel d'écurie	»	0,700
Vétérinaire	»	0,040
Magasins à fourrage	»	0,004
A reporter :	fr.	2,694

Report :	fr.	2,694
Ferrage	»	0,150
Divers	»	0,018
Renouvellement des chevaux	»	0,370
Sellerie	»	0,070
Eaux	»	0,007
Main d'œuvre d'écurie	»	0,018
	Fr.	3,327

Le nombre de journées de cheval est estimé à fr. 17 150 par an et le nombre de voitures-kilomètres parcourus à 214 426 ; d'où, par voiture-kilomètre,

$$\frac{17\,150 \times 3{,}327}{214\,426} = 0{,}266 \text{ fr.}$$

Cette somme ne comprend ni les frais généraux de direction, ni l'éclairage et chauffage des dépôts, ni l'entretien du matériel roulant.

Coût de la traction par prise de courant. — *Frais d'installation.* Pour les lignes à profil moyennement accidenté, il faut compter

30 chevaux	avec	1 à 5	voitures de 30	places	en service
25	»	» 5 à 10	»	»	»
20	»	» 10 à 15	»	»	»
15	»	» 15 à 25	»	»	»
10	»	» au delà de 25	»	»	»

Il faut, en outre, une réserve qui varie de 30 à 100 pour 100 suivant le nombre des machines génératrices.

Voici quelques prix unitaires qui sont d'ailleurs sujets à varier par suite de l'extension rapide de la traction électrique et de la concurrence qui en résulte.

Voie avec rails à rainure de 36 kg et réemploi du pavage, par km	fr.	26 000
Equipement électrique d'une voie simple avec ligne aérienne et poteaux métalliques, par km		17 000 à 22 000

Supplément pour voie double, par km .	fr.	4 000
Truc de tramway à 2 essieux.	»	1 500 à 2 000
Caisse à 30 places	»	4 000
Electromoteur de 25 chevaux	»	3 500
Voiture à 50 places avec 2 moteurs de 25 chevaux	»	15 000 à 18 000
Voiture à 30 places avec un moteur de 25 chevaux	»	10 000 à 12 000
Voiture à 30 places avec 2 moteurs. . .	»	12 000 à 15 000
Usine comptée à raison de 15 chevaux par voiture de 30 places et 25 chevaux par voiture de 50 places, y compris les bâtiments, par cheval	»	500 à 700

Les installations accessoires, telles que remises, magasins, bureaux, voies d'accès, etc., peuvent s'estimer à raison de 3 000 à 4 000 francs par voiture.

Dépenses d'exploitation par voiture-kilomètre. Afin d'établir une comparaison entre les divers systèmes de traction sans avoir à tenir compte des frais généraux qui sont plus ou moins variables suivant les charges financières des compagnies, on ne comprend, dans les dépenses d'exploitation, que la production du courant, l'entretien de l'usine, du matériel roulant et des dépôts, l'entretien des connexions électriques et le salaire des conducteurs des voitures.

L'estimation suivante se rapporte à une exploitation belge comportant 1 000 000 de km-voitures par an, et admet les prix de base suivants :

Houille	la tonne,	fr.	15,00
Chauffeur	par jour,	»	3,50
Machiniste	»	»	4,50
Mécanicien	»	»	4,50
Nettoyeur	»	»	4,00
Eau alimentaire	le mètre cube,	»	0,225

Frais annuels. Houille	fr.	24 650
Huile et chiffons	»	6 000
Eau	»	7 000
Traitement de l'ingénieur	»	5 000
Salaires des ouvriers de l'usine et du dépot	»	17 885
Entretien et réparation des machines, moteurs, trucs et ligne électrique	»	52 000
Total :	fr.	112 535

Soit par km-voiture 11,25ctm, non compris le salaire du conducteur, qui varie de 5 à 7 ctm par km-voiture.

Voici les frais d'exploitation des tramways de Boston, qui comportent plus de 2 000 000 de km-voitures par an.

		PRIX, EN CENTIMES, PAR KM-VOITURE.
Entretien du matériel. Machines à vapeur et chaudières	ctm.	0,64
Dynamos	»	0,40
Feeders	»	0,11
Poteaux	»	0,27
Lignes aériennes	»	1,04
Feeders de retour et connexions des rails	»	0,14
Lampes électriques	»	0,05
Moteurs		1,09
Engrenages	»	0,47
Collecteurs et divers	»	1,60
Contrôleurs et rhéostats	»	1,61
Trolleys	»	0,18
Production du courant. Dépenses générales	»	0,04
Main-d'œuvre	»	2,28
Combustible	»	2,89
Divers	»	0,38
Centimes :		13,19

Il est intéressant de remarquer que le combustible n'intervient que pour moins d'un quart dans les frais de traction et d'entretien.

En ajoutant à ces frais le salaire des conducteurs, des percep

teurs, les taxes diverses et les frais généraux résultant des charges financières, on trouve ordinairement entre 40 et 60 ctm de dépense totale par km-voiture.

Prix des lignes à caniveau et à conducteurs interrompus. L'installation relativement récente des lignes à caniveau et à conducteurs interrompus fait qu'on a peu de détails précis sur leurs coûts d'exploitation.

On estime de 60 000 à 100 000 francs la dépense par km de caniveau pour ligne à simple voie, sans les feeders ni la voie proprement dite.

Les frais d'installation des systèmes par conducteurs interrompus sont cotés entre 30 000 et 60 000 francs par km de voie simple.

Traction par accumulateurs. — Dans les systèmes de traction par accumulateurs à charge lente, il faut deux batteries par voiture, coûtant ensemble de 6 000 à 10 000 fr. Si l'on ajoute les installations de chargement, on arrive au total de 12 000 à 16 000 fr. par voiture.

Les accumulateurs à charge rapide sont plus lourds et chaque voiture ne comporte qu'une batterie ; celle-ci peut s'estimer à 9 000 fr.

Les frais d'entretien des accumulateurs s'évaluent entre 7 et 10 ctm par km-voiture.

Le coût de la traction par accumulateurs sur les lignes installées à Paris par la Société pour le travail électrique des métaux ne dépasse pas 40 ctm par km-voiture pour les grandes voitures à 50 places. C'est également la somme garantie pour l'exploitation des tramways parisiens au moyen d'accumulateurs à charge rapide.

Nous devons les devis suivants à M. Van Vloten, directeur du service électrique des tramways bruxellois.

Devis d'une installation comprenant 12 voitures automobiles de la contenance de 30 personnes, ces véhicules effectuant un parcours journalier de 100 kilomètres sur une voie exigeant l'emploi de deux chevaux par voiture :

Puissance motrice : 2 machines de 120 chevaux à condensation.	fr.	30 000
Fondations, tuyauterie.	»	5 000
A reporter :	fr.	35 000

Report :	fr.	35 000
Transmissions		3 100
Cheminée		3 500
2 chaudières de 120 ch., filtre, épurateur, etc.		19 000
8 dynamos de 16,5 kilowatts, avec fondations, tendeurs, etc.	»	40 000
Courroies		1 000
Accumulateurs : 40 batteries de 120 éléments de 13 kg. à 1 800 fr. l'une	»	72 000
Tiroirs, boîtes	»	24 000
Matériel roulant : 16 voitures avec installation électrique, à 6 000 fr. l'une	»	96 000
Installation mécanique de chargement		10 000
Appareils de mesure, outillage, divers		12 000
Total	fr.	315 600

Devis d'exploitation pour 12 voitures en service, fournissant un effet utile total de 1 200 km-voitures par jour :

Par km-voiture

Consommation de charbon	fr.	0,025
Graissage	»	0,007
Entretien et remplacement des organes mécaniques et électriques	»	0,025
Entretien des accumulateurs	»	0,070
Divers	»	0,015
Salaires des ouvriers chargés de l'entretien, non compris les conducteurs	»	0,033
Direction, frais généraux	»	0,050
Total	fr.	0,225

A cette somme, il convient d'ajouter la part correspondant à l'intérêt et à l'amortissement des installations.

Prix des automobiles de chemin de fer et des locomotives électriques. — Les automobiles à 2 bogies de 30 à 35 places coûtent . . . . . fr. 20 à 24 000

Les automobiles à 2 bogies de 50 places, avec 2 moteurs de 50 chevaux	fr.	30 000
Les locomotives Baldwin-Westinghouse à 2 moteurs de 100 chevaux, pesant 32 tonnes, coûtent. .	»	50 000
Celles à 4 moteurs de 200 chevaux, pesant 70 tonnes.	»	75 000
On voit que le prix de ces locomotives varie de	fr.	1,07 à 1,55 le kg.
La locomotive gearless de Baltimore, qui a demandé des études toutes spéciales, a coûté.	»	1,44 le kg.
La locomotive Heilmann est estimée à .	»	2,00 le kg.
Une petite locomotive de mines de Baldwin, de 30 chevaux, pèse 10 tonnes et revient à	»	1,50 le kg.

Il est intéressant de noter à côté de ces prix ceux des locomotives à vapeur :

Les locomotives d'express européennes, pesant 50 tonnes, coûtent.	fr.	1,60 à 1,80 le kg.
Les locomotives américaines de 55 tonnes.	»	1,10 à 1,30 le kg.

GAUTHIER-VILLARS ÉDITEUR

QUAI DES GRANDS-AUGUSTINS, 55, PARIS

DU MÊME AUTEUR

Leçons sur l'Électricité. — Tome Premier. Théorie de l'Électricité et du Magnétisme. — Électrométrie. — Théorie et Construction des Générateurs et des Transformateurs électriques, avec 388 figures dans le texte; 1900. — Tome Second. Canalisation et Distribution de l'énergie électrique. — Application de l'Électricité à la Téléphonie, à la Télégraphie, à la production et à la transmission de la puissance motrice, à la Traction, à l'Éclairage, à la Métallurgie et à la Chimie Industrielle, avec 387 figures dans le texte; 1900. . . . . 24 fr.

Mesures Électriques. — Leçons professées à l'Institut électrotechnique Montefiore. Un volume grand in-8°, avec 198 figures dans le texte; 1896 . . . . . 12 fr.

Traction Électrique. — Extrait des Leçons sur l'Électricité professées à l'Institut électrotechnique Montefiore . . . 3 fr. 50

B.L. 10 1913